

核融合炉のサイエンス・アセスメント

**Science Assessment of Fusion Power Plant**

1990

名古屋大学大型計算機センター

永井 亨

# 目次

要旨 .....	1
1. 序論 — 巨大科学のサイエンス・アセスメント .....	3
参考文献 .....	6
2. 資源・経済アセスメント .....	7
2-1. エネルギー分析の手法 .....	7
2-2. エネルギー供給手段としての核融合炉のエネルギー分析 .....	10
2-3. 材料インベントリーとエネルギー・インテンシティー .....	12
2-4. リチウムのエネルギー分析 .....	14
2-5. 核融合炉のエネルギー収支 .....	18
2-6. 核融合・核分裂ハイブリッド炉のエネルギー分析 .....	23
第二章まとめ .....	25
参考文献 .....	26
3. リスク・アセスメント .....	29
3-1. 安全解析 .....	29
3-2. 誘導放射能 .....	30
3-3. トリチウム .....	37
3-4. 核融合・核分裂ハイブリッド炉の安全性 .....	50
3-5. 知識ベース・システムを用いた異常連鎖の解析 .....	55
3-6. EAとの関連から .....	59
第三章まとめ .....	63
参考文献 .....	64
4. 結論 .....	68
4-1. 本研究で得られた成果 .....	68
4-2. 今後の課題 .....	68
参考文献 .....	69
謝辞 .....	70
Appendix A Energy Intensity for 554 Goods and Services in 1980 .....	71
Appendix B 核融合炉のエネルギー分析のためのEIデータベース .....	84
Appendix C 異常連鎖シミュレータのための構造モデル用データ .....	93

Appendix D	異常連鎖シミュレータの知識ベース	95
Appendix E	異常連鎖シミュレータのソース・プログラム	100
Appendix F	異常連鎖シミュレータの実行例	107
Appendix G	磁場閉じ込め、慣性閉じ込め以外の制御核融合について	113

## 要旨

本論文は、次の二つの論文を中心にまとめたものである。

T.NAGAI and Y.SHIMAZU (1984) Science Assessment of Fusion Power Plant.  
Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol.32, 1-48.

T.NAGAI (1986) Science Assessment of Fusion Power Plant II - Risk  
Assessment. Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol.34, 23-65.

核融合研究は、現在の実験炉の段階でその規模および経費は既に相当巨大化しており、計画段階でのチェック(アセスメント)が必要となっている。予算が巨額になるため、複数の炉タイプの研究開発路線がある場合にその優先順位を決定することが必要で、また、将来のエネルギー源の一つと位置付けられているのであるから、核融合が「技術的に実現可能か?」のチェックに加えて「社会的に受け入れられるか?」の視点からのチェックが要求される。現在行われている商業用核融合炉の概念設計は、現在の知見を総合し、クリティカル・パスを発見するための総合シミュレーションとしての重要性を持つが、商業炉として受け入れられるためには、研究開発の一貫としてさらにもう一つ「社会的に受け入れられるか?」のチェックを付け加える必要があり、そして、その結果は研究計画の次の段階に反映されるべきである。したがって、巨大化した科学研究の中に built in された形でこれを支援するためのアセスメント・システムが必要であると考え。これをサイエンス・アセスメントと呼ぶ。サイエンス・アセスメントは核融合研究の進行に合わせて、(1)資源・経済アセスメント、(2)リスク・アセスメント、(3)環境アセスメント、(4)社会・政策アセスメントの四つの段階に分けられるが、本研究ではこれまでに発表された商業炉の概念設計を対象に資源・経済アセスメントとリスク・アセスメントを行った。

資源・経済アセスメントでは、エネルギー分析の手法を用いて、核融合炉のエネルギー供給手段としての有効性と稀少資源の入手可能性を評価した。結論は次のようになる。

- 1) D-T炉では、出力1000MW。あたり数百トンのリチウムを消費するため、リチウム資源を海外に依存するわが国ではその確保が重要な課題であるが、エネルギー分析からみても、リチウムのエネルギー・インテンシティは他の材料に比べて一桁大きく、また、 ${}^6\text{Li}$ 濃縮や海水抽出を行う場合にはさらに二~三桁大きくなるため、リチウムの消費を抑えた炉設計が望まれる。エネルギー消費を減らすような濃縮法、海水抽出法の開発も必要であるが、その際、他産業への影響も考慮しなければならない。
- 2) D-T炉への投入エネルギーの内、磁場閉じ込めでは炉設備が42~54%を占め、また、慣性閉じ込めではドライバー・システムが41%を占める。D-T核融合炉のエネルギー比は16.2~26.8となったが、炉タイプの違いによるエネルギー比の差は認められなかった。また、D-T炉のエネルギー比は核分裂炉のエネルギー比と同程度またはそれよりも大きく、したがって、エネルギー分析からみると核融合炉は核分裂炉と

競争可能である。なお、D-D炉のエネルギー比は5.9~6.2となった。

3)  ${}^6\text{Li}$ を濃縮したリチウムをトリチウム増殖材として使用する場合には、濃縮法によって投入エネルギーおよびエネルギー比が大きく変化し、核融合におけるリチウムは核分裂におけるウランと類似した役割を果たす。この点ではリチウムは準燃料的な意味を持つ。

4) 核融合・核分裂ハイブリッド炉では、単純な核融合炉としてみた場合にはエネルギー比は9.3~27.1となり、電力生産、燃料生産のいずれを主にするかで差が大きい。ハイブリッド炉と核分裂炉とを組み合わせる場合には、エネルギー比は34.2~41.3となり、それぞれ個別に考えるよりも非常に有利になる。

リスク・アセスメントでは、トリチウムや放射化材料など核融合炉プラント内に存在する放射性物質や発生する放射性廃棄物の量を定量化し、また、運転時および事故時の周辺公衆に及ぼす影響を評価した。さらに、知識工学的手法を用いた異常連鎖予測のためのシミュレーションを試みた。結論は以下のようになる。

1) 核融合炉で発生する誘導放射能の毒性は、核分裂炉からの使用済み燃料よりも小さいが、放射能レベルは核分裂炉の場合に匹敵する。発生する誘導放射能の量はブランケット構造材の選択に強く依存するため、アルミニウム合金のような低放射化材料の使用が望まれる。

2) 核融合炉の廃止措置に伴って発生する炉設備からの放射性廃棄物の量は、D-T炉では重量、体積共に、核分裂炉の原子炉圧力容器からの発生量の約20倍となる。ただし、超電導線材を含むシールド外側に位置する材料の多くは再利用可能である。また、D-D炉ではD-T炉の場合の約2倍の放射性廃棄物が発生する。

3) 周辺公衆に対する安全性からはトリチウムが最も重要であるが、事故時のトリチウム漏洩を想定した場合、D-T炉では非居住区域をプラント敷地内に含めるためには敷地面積を2 km $\times$ 2 kmにする必要がある。立地制約の厳しいわが国では、この規模の用地を確保することは重大な問題となる。また、D-D炉では非居住区域と低人口地帯を含めて敷地面積は1 km $\times$ 1 km必要となる。

4) ハイブリッド炉では、核分裂生成物とアクチノイドによる放射能が支配的で、放射能レベルと毒性は共に核分裂炉と同程度あるいはそれよりも大きい。ブランケットの選択に関して、稼働期間中の安全性からは、トリウムを親物質とし、ブランケット中での核分裂反応を抑制した設計が望ましい。しかし、トリウムを親物質とするブランケットでは運転停止後アクチノイドの空気に対するBHP値が増大し、放射性廃棄物管理の問題が生じる可能性がある。

5) 知識ベース・システムを用いて核融合炉システムの事故時の異常連鎖を解析するためのシミュレータを試作した。核融合炉システムの安全性を確保するために必要な安全機能を明確にしていく上で知識工学的アプローチは有効である。

## 1. 序論 — 巨大科学のサイエンス・アセスメント

アセスメント (assessment) とは、ある計画を実施した際もたらされるであろう各方面への影響を事前に予測・評価して、その計画を実施するかどうかの判断材料にすることをいう。例えば、道路やゴミ処理場を建設する場合に、大気汚染、水質汚濁、震動、騒音、自然景観など、計画の実施によってもたらされるであろう環境への影響を事前に予測・評価し、その結果は公表される。これを環境アセスメント (environmental assessment) と呼ぶ。新しい技術の導入に際して行われるのが技術アセスメント (technology assessment) である。アセスメントは本質的に check & review の機能を持ち、計画推進者以外の第三者の立場から「何か忘れていないか？」のチェック (特にマイナスの影響の評価) を行うことともいえる。

核融合研究は、実用化はまだ先の話ではあるが、実験炉の段階でその規模および経費は既に相当巨大化しており、計画段階でのチェックが必要となっている。例えば、敷地の選定にあたって、環境アセスメントが必要となる規模を持っている。また、予算が巨額になるため、複数の炉タイプの研究開発路線がある場合に、その優先順位を決定することが必要となる。さらに、将来のエネルギー源の一つとして位置付けられているのであるから核融合炉が「技術的に実現可能か？」 (technical feasibility) のチェックに加えて「社会的に受け入れられるか？」 (social acceptability) の視点からのチェックが要求される。

現在、いくつもの閉じ込め方式、炉タイプについて商業炉の概念設計が行われているが、核融合研究の進行の中で概念設計を図1-1のように位置付けることにする。まず、プラズマ物理、材料に基づくいわゆる物理設計において「科学的に可能か？」をチェックして炉システムの構想を決める (シナリオ段階)。次に、炉工学に基づいて「技術的に可能か？」のチェックを行って材料インベントリーがわかる程度に詳細な概念設計が固まる (材料インベントリー段階)。そして、通常の場合は、図1-1に示すように、実施設計、詳細設計を経て建設に至る。しかし、現在行われている概念設計は、実現を前提としたものではなく、むしろ、現在の知見を総合し、クリティカル・パスを発見するための総合シミュレーションとしての重要性を持つ。商業炉として受け入れられるためには、研究開発 (R & D) の一環としてさらにもう一つ「社会的に受け入れられるか？」のチェックを付け加える必要があり、そして、その結果は研究計画の次の段階に反映されるべきである。本来、アセスメントは客観性を保証するため、核融合研究者とは一線を画する第三者が行うべきであるが、現在の商業炉の概念設計のように計画自身の熟度が低く、また、種々の代替案の優先順位を判断することに重きを置く場合には、計画策定者自身が計画の一部としてアセスメントを実施し、その結果を計画の次の段階に反映させていく方が実際的である。ゆえに、研究計画の中に built in された形でこれを支援するためのアセスメント・システムが必

要であるとする。これは、巨大化した科学研究の中に built in された形でそれ自身へのフィードバックを図る新しい科学研究の方法を志向するものである。これをサイエンス・アセスメント (science assessment) と呼ぶ (島津、1980、1981、1983 および 1986)。本研究の主題は、サイエンス・アセスメントの手法を開発することにある。

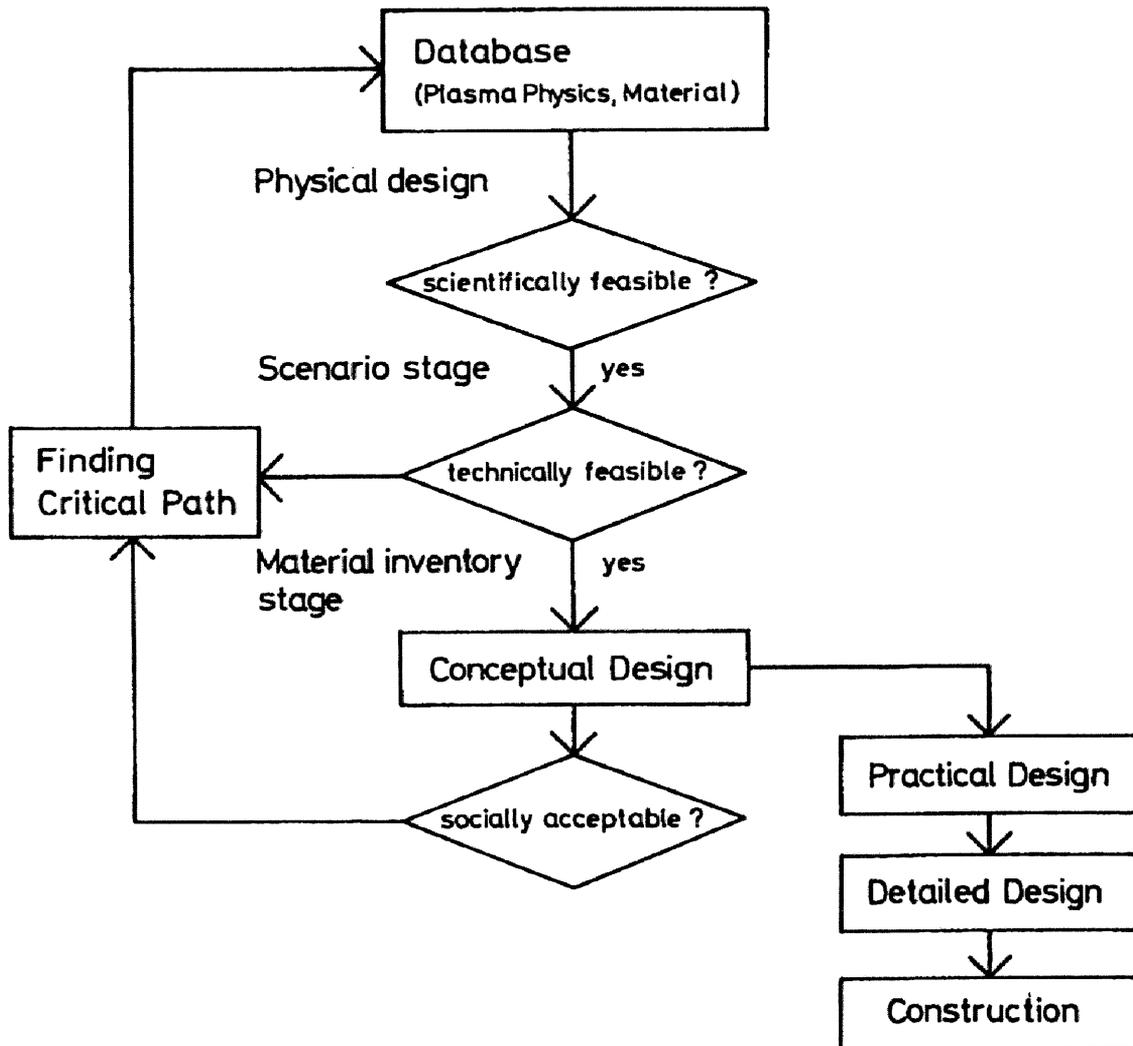


図1-1. 核融合研究における概念設計の位置付け

科学研究は国を越えた普遍性を持つが、社会的適合性は本質的に自然環境や社会環境など、わが国固有の条件に依存する。サイエンス・アセスメントは次の四つのタイプに大別される。

- (1) 資源・経済アセスメント (resource-economy assessment: REA)  
エネルギー供給手段としての経済性、稀少資源の入手可能性
- (2) リスク・アセスメント (risk assessment: RA)  
運転時、事故時の構造的安全性

(3) 環境アセスメント (environmental assessment : EA)

環境への安全、適合性

(4) 社会・政策アセスメント (socio-political assessment : SPA)

社会への適合性 (エネルギー政策における位置付け、研究開発路線の選択)

研究の進行に伴って(1)~(4)の順に重要度が変わり、特に(4)は(1)~(3)の総合評価である。(1)~(4)のアセスメントの内容と相互関係を図1-2に示す。

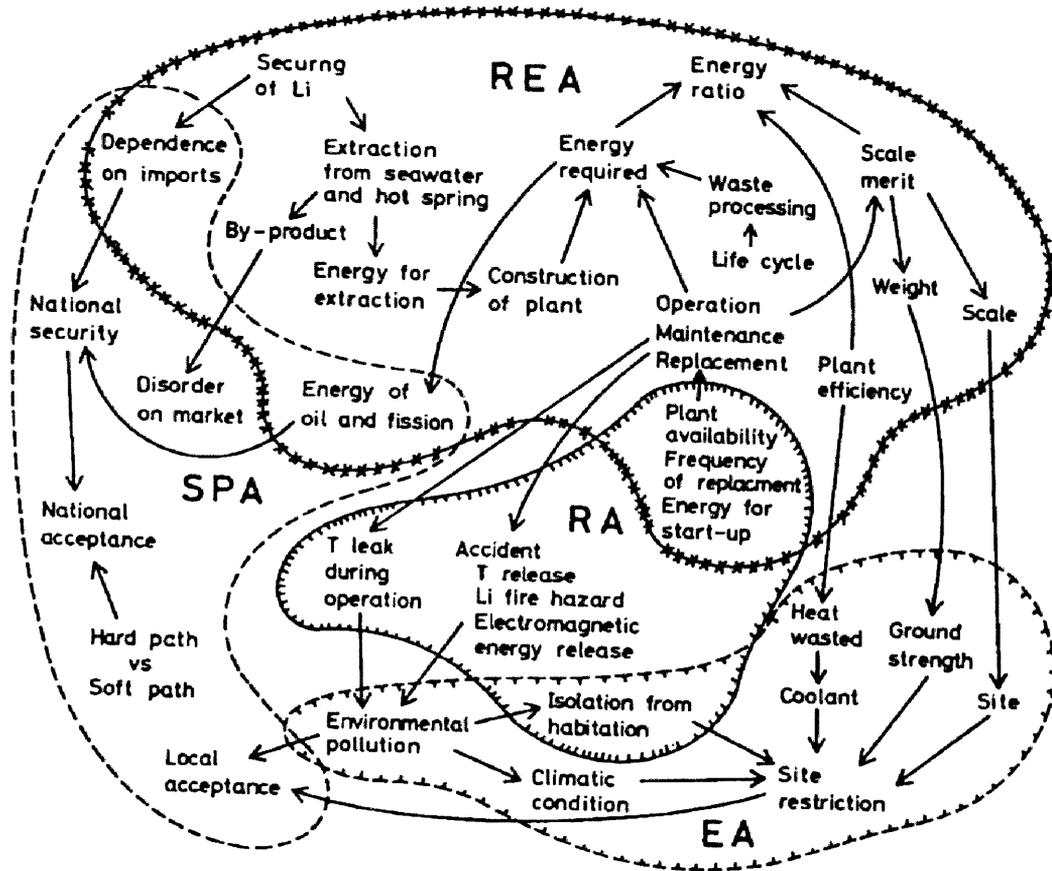


図1-2. 核融合炉のアセスメント

本研究では、

第二章：資源・経済アセスメント

第三章：リスク・アセスメント

を行う。第二章では、発表されている商業炉の概念設計を対象に、エネルギー分析の手法を用いて核融合炉のエネルギー供給手段としての有効性を評価する。評価指標としてエネルギー比 (=核融合炉からの出力エネルギー ÷ 発電所の建設・運転のための入力エネルギー) を用いる。また、核融合に特有な材料であるリチウム (Li) に関してその入手可能性を検討する。次に、第三章では、潜在的危険性を持つ事項 (トリチウム (T)、誘導放

射能など) に関して、核融合炉プラント内に存在する放射性物質や発生する放射性廃棄物の発生量を定量化し、また、運転時および事故時の、特に周辺公衆に及ぼす影響を評価して、制約条件を明らかにする。また、知識工学的手法による核融合炉システムの構造的安全性の解析を試みる。

〔第一章参考文献〕

島津康男(1980)核融合研究のSCIENCE ASSESSMENT. 「核融合炉設計と評価に関する研究」第一回シンポジウム報告集, 51-61.

島津康男(1981)核融合の資源・環境・社会アセスメントへの序論. 「核融合炉設計と評価に関する研究」第二回シンポジウム報告集, 39-44.

島津康男(1983)核融合炉アセスメントの研究. エネルギー特別研究(核融合)研究成果報告会予稿集, 76-77.

島津康男編著(1986)核融合炉SYSTEM ASSESSMENT MANUAL. エネルギー特別研究(核融合)「核融合炉のアセスメントに関する研究」, 232pp.

## 2. 資源・経済アセスメント

### 2-1. エネルギー分析の手法

一般に、社会経済活動におけるエネルギーの流れを計量することをエネルギー分析と呼び、特に、種々の製品を生産するのに要する直接・間接のエネルギーを定量化することをいう（E P R I、1978）。エネルギー分析の手法は、農業、輸送、発電システム（特に原子力発電所）などの分野に応用されている。エネルギー分析で基本となる要素はエネルギー・インテンシティ（energy intensity；以下EI）で、これはある製品の単位量（物量または金額）を生産するのに必要な直接・間接のエネルギー量を表わす。個々の製品のEIを計量する手法には基本的に二つあり、それぞれプロセス分析、および、産業連関分析と呼ばれている。

プロセス分析は次のようにして行う。まず、着目している製品の全生産過程を洗い出し、それぞれの過程でその製品の単位量当りに投入される原材料等を求める。次に、それらの原材料一つ一つについて直接・間接の投入エネルギーを求め、さらに、これらを足し合わせることによって着目している製品の単位量当りの投入エネルギー、すなわち、EIを求める。理論的には、生産過程はtree構造ではなくnet構造を持つため、一つの製品のEIを求めるには上の操作を無限回繰り返す必要があるが、実際には上の操作は数ステップで打ち切られる。それに伴う誤差を評価することは難しい。プロセス分析は時間と労力を要するが、基本的にどのような製品にも適用できるため、特に、特殊な材料のEIを計量する場合に重要である。

Bullard and Herendeen（1975）によって開発された産業連関分析の手法は、EIを求めるのに産業連関表を利用する。ここで、N部門から成る経済システムを考え、それぞれの部門では1種類の製品しか生産しないものとする。ある期間内（通常は1年）にj部門に売られた製品iの量（物量または金額）を $T_{ij}$ 、i部門の総生産量を $X_i$ 、i部門の最終需要を $Y_i$ 、j部門の付加価値を $V_j$ とすると、産業間の取り引きは図2-1に示すような産業連関表に表わされる。図2-1から、

$$X_j = \sum_{i=1}^N T_{ij} + V_j \quad (2-1)$$

となる。産業連関分析の根本的な仮定として、ある部門から産出される製品に具現化されるエネルギーはその部門への投入物に含まれるエネルギーとその部門が環境から取り出したエネルギーの和に等しいことを仮定する。

$e_j$ をj部門のEI、 $e_j$ を部門jが環境から取り出した製品単位量当りのエネルギーとすると、（2-1）式を部門jに関するエネルギー収支を表わす式に書き替えれば、

outputs inputs		→ j					total gross outputs
		1	2	3	.....	N	
industry 1 ↓ 2 3 ⋮ i N	Intermediate Demand ( $T_{ij}$ )	Final Demand ( $Y_j$ )					( $X_i$ )
	Value Added ( $V_j$ )						
total gross outlays	( $X_j$ )						

$$X_i = \sum_j T_{ij} \cdot Y_j \text{ (outputs)}$$

$$X_j = \sum_i T_{ij} \cdot V_i \text{ (inputs)}$$

$$X_i = X_j \text{ (i=j)}$$

図2-1. 産業連関表の模式図

$$\epsilon_j X_j = \sum_{i=1}^N \epsilon_i T_{ij} + \epsilon_j X_j \quad (2-2)$$

となる。ただし付加価値に含まれるエネルギーは無視している。次に、投入係数  $a_{ij}$  を次のように定義する。

$$a_{ij} = \frac{T_{ij}}{X_j} \quad (2-3)$$

$a_{ij}$  を用いて (2-2) 式は下のようにならされる。

$$\epsilon_j X_j = \sum_{i=1}^N \epsilon_i a_{ij} X_j + \epsilon_j X_j \quad (2-4)$$

すなわち、

$$\bar{\epsilon} = \sum_{i=1}^N \epsilon_i a_{ij} + \epsilon_j \quad (2-5)$$

である。行列を使って (2-5) 式を表現すると、

$$\bar{\epsilon} = {}^t A \bar{\epsilon} + \bar{e} \quad (2-6)$$

となる。ここで、 ${}^t A$  は投入係数行列の転置行列である。単位行列を  $I$  とすれば、

$$\vec{e} = (I - {}^tA)^{-1} \vec{e} \quad (2-7)$$

を得る。一つの経済システムの産業間の取り引きが産業連関表に表わされているため、産業連関分析では、(2-7)式を使って複数の部門のE Iを同時に計算することができる。また、種類の異なるエネルギー資源を扱う場合にも(2-7)式は応用でき、「熱エネルギー・インテンシティー」や「電気エネルギー・インテンシティー」などが計算できる。熱エネルギー・インテンシティーは単位量の製品に含まれている石炭、石油、天然ガスなどの一次エネルギーを表わす。一次および二次(電気)のエネルギー・インテンシティーを単純に足し合わせて、「総エネルギー・インテンシティー」を求めることはできないことは明らかである。なぜなら、例えば、発電のために消費された石油エネルギーが重複して計量されるからである。この重複をさけるため、発電に占める一次の熱エネルギーの寄与分を差し引く必要がある。そのために、水力および原子力を熱エネルギーに換算するための係数を用意することにする。

核融合炉のエネルギー分析のため、わが国の1980年産業連関表を用いて554部門のE Iを計算する。そのためには、仮想的に閉じた系の中での「国内エネルギー・インテンシティー」を得る必要があるが、本研究では、非競争輸入品部門のE Iは、国内のそれに対応する部門のE Iに輸送エネルギーを加えたものに等しいと仮定している。また、いくつかの輸入品のE Iのデータは、未来工学研究所(1978)によるプロセス分析およびKimら(1980)による産業連関分析の結果から採った。副産物の扱いに関しては、副産物のE Iはそれ自身を主産物として生産している部門の平均のE Iに等しいとした。屑は、副産物と異なり、これを主産物として生産する部門がないものである。屑のE Iを決める場合、この値を0とみなしてしまうか、または、類似した製品の部門のE Iをもとにして屑のE Iの値を仮定することが考えられる。ここでは、鉄屑のE Iは、銑鉄、フェロアロイ、粗鋼の3部門の平均のE Iに0.5を掛けたものに等しいと仮定し、また、非鉄金属屑のE Iは、電気銅、鉛、亜鉛、アルミニウム、その他の非鉄金属地金の5部門の平均のE Iに0.5を掛けたものに等しいと仮定した。(平均のE Iにかける重みを0.0~1.0の間で変えた場合、重みを0.5としたときを基準にして、屑以外の素材のE Iは、-8%~9%の間で変化する。)

以上の仮定をもとにして1980年の日本の経済活動のE Iを計算する。環境から取り出されたエネルギー資源を表2-1に、また、計算された554部門のE IをAppendix Aに示す。1980年の水力および原子力の発電量の比から、電力の熱エネルギーへの換算係数を504kcal/kwhとした。

表2-1. 環境から取り出したエネルギー（554部門、1980年）

部門	国産	輸入	単位
木炭	7.00	—	10 <sup>6</sup> kcal/t
薪	274.	—	10 <sup>6</sup> kcal/10 <sup>3</sup> 個
原料炭	7.73	8.33	10 <sup>6</sup> kcal/t
一般炭	5.71	—	10 <sup>6</sup> kcal/t
無煙炭	3.97	4.60	10 <sup>6</sup> kcal/t
亜炭	4.10	—	10 <sup>6</sup> kcal/t
原油	9.40	9.78	10 <sup>6</sup> kcal/kl
天然ガス	273.4	—	10 <sup>6</sup> kcal/10 <sup>6</sup> 円

## 2-2. エネルギー供給手段としての核融合炉のエネルギー分析

核融合炉には特殊な材料や装置が必要であるが、それらの選択にはいまだ多くの議論が残されており、経済的最適化の下でどのように材料や炉の規模を決定するかということは非常に重要である。しかし、核融合研究の現在の段階では、プラズマや材料に関する知識、また、技術的側面に関しても不確定な部分があり、具体性のある商業炉を想定することは難しい。従って、このような不確定性を考慮しながら核融合炉のエネルギー分析を行わなければならない。その目的は、

- 1) 概念設計からの材料インベントリーとE Iとに基づいて核融合炉への投入エネルギーを求める
- 2) 消費量が多量となるために、あるいは、E Iが大きいために、その材料や装置への投入エネルギーが大きくなり、全体に占める割合が大きいものや資源的制約のある材料を調べる
- 3) エネルギー比（投入エネルギーに対する出力エネルギーの比）を計算し、エネルギー収支を評価する
- 4) エネルギー収支に関して、主なパラメータ（炉の規模、運転条件、材料の選択など）の感度分析を行い、また、他の発電システム（特に核分裂炉）のエネルギー分析結果と比較する
- 5) そして、上の結果を研究開発の次の段階に反映させる

ことである。

エネルギー分析を行うに当たって、Argonne National Laboratory (1980) による商用トカマク型D-T (deuterium-tritium) 核融合炉の概念設計STARFIREをreference designとして選んだ。その理由は、トカマク炉の研究は現在最も進んでおり、STARFIREの概念設計にはエネルギー分析が適用できる程度に詳細な材料インベントリーが与えられているからである。核融合炉のエネルギー分析は、これまでに未来工学研究所、Tsoulfanidis (1981)、Buende (1981) などによって行われている。

核融合炉のエネルギー分析の流れを図2-2に示す。核融合炉の概念設計とエネルギー分析の手法が基礎を成

す。STARFIREのエネルギー分析を行う場合に、炉設備への投入エネルギーは概念設計からの材料インベントリーと、産業連関分析およびプロセス分析によるEIをもとに計算する。しかし、炉設備を除くその他の設備に関しては、類似した設備が多く含まれる核分裂炉のエネルギー分析結果をもとにして投入エネルギーを求める。

STARFIREでは、トリチウム増殖材の選択に関して下のように二つの場合を考えている。

Case 1 :  $\alpha$ -LiAlO<sub>2</sub> (天然リチウム)

Case 2 :  $\alpha$ -LiAlO<sub>2</sub> (<sup>6</sup>Li 60%濃縮)

上の二つの場合に対応して、中性子増倍材の選択も変わる。中性子増倍材としてCase 1ではベリリウムが、Case 2ではZr<sub>5</sub>Pb<sub>3</sub>が使用される。後に示すように、Case 2はリチウム同位体分離法によってさらに二つに分けられる。すなわち、

Case 2-1 : イオン交換法による分離

Case 2-2 : 水銀アマルガム法による分離

である。上の三つの場合が感度分析の対象となる。

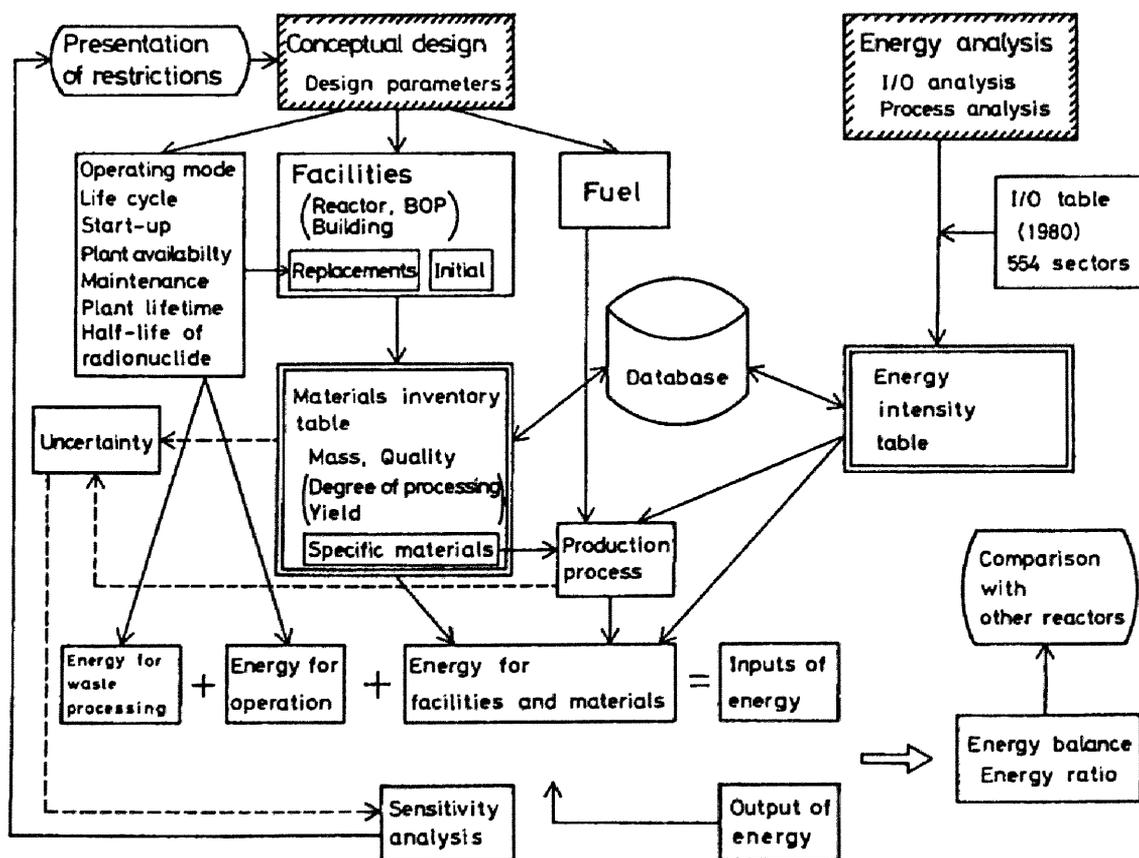


図2-2. 核融合炉のエネルギー分析の流れ

### 2-3. 材料インベントリーとエネルギー・インテンシティー

STARFIREの炉設備に使用される材料の初期投入量を表2-2に示す。Case 1とCase 2のいずれの場合もPCA (Prime Candidate Alloy)、Fe1422、304SSなどの構造材が全体の重量の約70%を占める。

核融合炉で使用される材料のEIを実際に求める場合に、産業連関分析とプロセス分析とを組み合わせで行う。粗鋼、銅などの一般性の高い基本的な材料は産業連関分析により求める。1980年の日本の産業連関表から計算したEIはAppendix Aに示されている。ステンレス鋼、超電導線材など、産業連関表からは得られない特殊な材料のEIはプロセス分析により求めた。得られた核融合炉材料のEIを表2-3に示す。炉設備の製造に要するエネルギーに関しては、(1)材料エネルギーと製造エネルギーとの比率、(2)航空機の製造エネルギー、(3)原子炉压力容器の製造エネルギーの三つの場合を検討した (Appendix BのB-4参照)。ここでは、核融合炉製造に関わる特殊性は、原子炉压力容器の場合と類似すると考えて、炉設備の製造に要するエネルギーは原子炉压力容器の製造エネルギーに等しいと仮定し、そのEIは $5.96 \times 10^7$  kcal/t (政策科学研究所、1977)となる。以上のEIを使って、概念設計に与えられた材料インベントリーをもとに炉設備に投入されるエネルギーを求める。

表2-2. STARFIRE炉の材料インベントリー  
単位はトン (%)。

材料	Case 1	Case 2
PCA	450.0 ( 1.8)	450.0 ( 1.8)
Zr <sub>5</sub> Pb <sub>3</sub>	0.0 ( 0.0)	328.0 ( 1.3)
LiAlO <sub>2</sub>	606.5 ( 2.5)	606.5 ( 2.4)
C	164.0 ( 0.7)	164.0 ( 0.7)
W	840.0 ( 3.4)	840.0 ( 3.4)
B <sub>4</sub> C	865.0 ( 3.5)	865.0 ( 3.5)
Ti64	147.0 ( 0.6)	147.0 ( 0.6)
TiH <sub>2</sub>	1646.0 ( 6.7)	1646.0 ( 6.6)
Fe1422	12687.9 ( 51.3)	12687.9 ( 50.7)
Cu	2188.0 ( 8.8)	2188.0 ( 8.7)
G-10CR	428.7 ( 1.7)	428.7 ( 1.7)
Nb <sub>3</sub> Sn	51.0 ( 0.2)	51.0 ( 0.2)
NbTi	90.0 ( 0.4)	90.0 ( 0.4)
Ta5W	32.0 ( 0.1)	32.0 ( 0.1)
Be	53.0 ( 0.2)	1.2 ( 0.0)
304SS	4485.2 ( 18.1)	4485.2 ( 17.9)
合計	24734.3 (100.0)	25010.5 (100.0)

炉設備を除くその他の設備は、既存の原子力発電所と類似あるいは共通の設備が多いため、政策科学研究所および科学技術庁資源調査会 (1979; 以下資源調査会) による軽水型原子力発電所 (以下LWR) のエネルギー

一分析結果に基づいて投入エネルギーを計算する。建屋、資材輸送のE IもLWRのエネルギー分析を参考にす  
 る。土地造成のE Iに関しては、敷地面積が511haで、造成の規模が核融合炉プラントの場合と同程度と考  
 えられるため、関西国際空港の事例（関西国際空港株式会社、1985）に基づいて求め、その値は  
 $3.74 \times 10^9 \text{ kcal/ha}$ となる。以上のE Iをまとめると表2-4のようになる。重イオン慣性核融合炉  
 に関しては、ドライバー・システムへの投入エネルギーは表2-4に示すように炉設備の場合と同様にして求め  
 ることとし、その製造エネルギーのE Iは、LWRの発電機等の設備のE Iと等しいと仮定して $3.14 \times 10^7$   
 $\text{kcal/t}$ （資源調査会）とする。さらに、ドライバー・システムの建屋のE Iは鉄骨鉄筋コンクリート造集  
 合住宅のE Iと等しいと仮定して $1.41 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2$ （資源調査会）とし、ドライバー・システムのト  
 ンネルのE Iは一般道路のトンネルのE Iと等しいと仮定して $2.16 \times 10^{10} \text{ kcal/km}$ （茅、1980）  
 とする。

尚、核融合炉のためのE Iデータベースの詳細はAppendix Bに示してある。

表2-3. 核融合炉材料のエネルギー・インテンシティー  
 単位は $10^6 \text{ kcal/t}$ 。

PCA	40.5*	Fe (粗鋼)	5.59 <sup>+</sup>
SUS304	31.3*	Cu (電気銅)	11.3 <sup>+</sup>
SUS316	32.1*	NbTi超電導線 (PFコイル用)	$8.11 \times 10^3$ *
Inconel 718	93.8*	NbTi超電導線 (TFコイル用)	$1.66 \times 10^3$ *
Fe1422	9.9*	Nb <sub>3</sub> Sn超電導線	$7.07 \times 10^3$ *
Ti64	299.*	LiAlO <sub>2</sub> (天然組成)	42.2*
TiH <sub>2</sub>	204.*	<sup>6</sup> Li 60% LiAlO <sub>2</sub>	$3.66 \times 10^3$ *
グラファイト	50.°	(水銀アマルガム法による)	
Zr <sub>5</sub> Pb <sub>3</sub>	5.45 <sup>+</sup>	<sup>6</sup> Li 60% LiAlO <sub>2</sub>	$3.18 \times 10^4$ *
タングステン	74.5 <sup>+</sup>	(イオン交換法による)	
セメント	1.41 <sup>+</sup>	G-10CR	-
B <sub>4</sub> C	50.°	Ta5W	-
ベリリウム	860.°		

注) E Iの出典は以下のとおりである。

- \* ; 本研究のプロセス分析より。
- + ; 本研究の産業連関分析より。
- ° ; 未来工学研究所の結果より。
- ; 計量されず。

表2-4. エネルギー・インテンシティーのデータベース

	材料	製造
炉設備	表2-3を見よ。	$5.96 \times 10^7$ kcal/t
ドライバー・システム	表2-3を見よ。	$3.14 \times 10^7$ kcal/t
その他の設備	$4.87 \times 10^8$ kcal/MW <sub>e</sub> 。	$3.44 \times 10^8$ kcal/MW <sub>e</sub> 。
建屋	$4.31 \times 10^8$ kcal/MW <sub>e</sub> 。	$5.56 \times 10^8$ kcal/MW <sub>e</sub> 。
資材輸送	$2.70 \times 10^8$ kcal/MW <sub>e</sub> 。	
土地造成	$3.74 \times 10^9$ kcal/ha	

#### 2-4. リチウムのエネルギー分析

地殻中に含まれるリチウムの量は20 ppmで鉛と同程度の多さで分布するという(松田、1979)。しかし、工業的に取り出せるリチウムの量は限られている。D-T炉を目指す限りリチウムは核融合炉材料として不可欠であるため、リチウム資源の確保は重要である。リチウム鉱石中にはLi<sub>2</sub>Oの形で3~10%含まれているが、鉱石から取り出してトリチウム増殖材用のリチウムを得るのに必要なエネルギーもまた資源・経済アセスメントの観点から重要である。

純電力1200MW<sub>e</sub>の商業用核融合炉STARFIREでは30年の稼働期間中に178tのリチウムを消費する。<sup>6</sup>Liを60%に濃縮したリチウムを使う場合には、単純計算で1335tの天然リチウムが必要となる。これに対し日本で消費されているリチウムの全量は1980年で570tである。さらに、リチウムはすべて輸入に依存しているため、わが国ではリチウム資源の確保は重大な問題である。U. S. Bureau of Minesは世界のリチウム埋蔵量および資源量をそれぞれ $1.9 \times 10^6$  tおよび $7.3 \times 10^6$  tと評価しているが、一方では、2000年における需要量を $2.8 \times 10^4$  t、また、2000年までの累積需要量を $3.6 \times 10^5$  tと予測しており(Argonne National Laboratory)、世界的に見てもリチウム資源は必ずしも十分とはいえない。海水中のリチウムの濃度は0.17 ppmと希薄ではあるが、その総量は $2.5 \times 10^{11}$  tと評価され(Steinberg and Dang、1975)、したがって、海水中のリチウムが回収可能であるならば、ほぼ無尽蔵の資源といってよく、わが国でも自給可能となる。リチウムの海水抽出に要するエネルギーについては後で検討する。

液体リチウムは、熱輸送に優れているため一次冷却材としても同時に使用でき、また、ブランケット中のトリチウム・インベントリを低く抑えることができるなどの利点があるものの、安全性の観点からは、空気や水と容易に反応するという欠点があるので、STARFIRE設計では、固体増殖材のみを考えている。主な固体増

殖材の候補は、 $\text{LiAlO}_2$ 、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_7\text{Pb}_2$  などであるが、化学的安定性、他の材料との適合性、中性子との反応特性、トリチウム回収の容易さなどの判断基準から $\alpha$ - $\text{LiAlO}_2$  が選ばれている。 $\gamma$ - $\text{LiAlO}_2$  と比較した $\alpha$ - $\text{LiAlO}_2$  の主な長所は密度が高いこと、 $\alpha$  は約900℃以下で安定な相であることである。天然の場合、リチウムは7.5%の $^6\text{Li}$ と92.5%の $^7\text{Li}$ から成るが、この同位体存在比はトリチウム増殖に影響を与えるため、STARFIREでは天然リチウムと濃縮リチウムの両方を考慮している。

以下で、鉱石からリチウムを生産する場合のエネルギー投入量を評価する。ただし、電力のEIは2450 kcal/kwhと仮定している。

(1) 採鉱・精錬

リチウムを鉱石から取り出すとして、採鉱・精錬に要するエネルギーは未来工学研究所によるプロセス分析のデータに基づいて求める。結果は表2-5に示してある。リチウム鉱石（鱗雲母、Li 2.3%含有）を採鉱、粉碎、溶解し、 $\text{LiCl}$ として晶出させ、これをさらに電気分解して金属リチウムを得る。これらに要するエネルギーは $4.02 \times 10^8$  kcal/tとなる。表2-5中の消費電力 $75 \times 10^3$  kwhの内 $60 \times 10^3$  kwhは $\text{LiCl}$ を電気分解して金属リチウムを生産するためのエネルギーであるから、 $\text{LiCl}$ のEIは $2.55 \times 10^8$  kcal/t-Liとなる。1tの鉱石から21kgのリチウムが生産されるのであるから歩留まりは0.93である。

表2-5. リチウムの採鉱・精錬に要するエネルギー

材料またはエネルギー源		Li 1トン当たり必要量	
種類	エネルギー・インテンシティ <sup>a</sup>	物量	エネルギー ( $10^6$ kcal)
リチウム鉱石	$0.4 \times 10^6$ kcal/t °	48 t	19
電力	$2.45 \times 10^3$ kcal/kwh	$75 \times 10^3$ kwh <sup>b</sup>	184
蒸気	$0.5 \times 10^6$ kcal/t °	200 t	100
$\text{H}_2\text{SO}_4$	$2.09 \times 10^5$ kcal/t +	12 t	3
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	$3.26 \times 10^6$ kcal/t +	12 t	39
HCl	$3.05 \times 10^6$ kcal/t +	15 t	46
KCl	$1.11 \times 10^6$ kcal/t +	10 t	11
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-	1.5 t	-
合計			402

<sup>a</sup> EIの出典は表2-3の注の分類と同じ。

<sup>b</sup> 消費電力の内 $60 \times 10^3$  kwhは $\text{LiCl}$ の電解エネルギーである。

(2) 濃縮

ここではリチウム同位体分離法としてイオン交換法と水銀アマルガム法を考える。いずれの方法も大量生産のためのスケール・アップが比較的容易と考えられており、それぞれの方法によるリチウム同位体分離プラントの概念設計に基づいて濃縮エネルギーを求める。

イオン交換法に関しては藤根ら（1981）による設計をもとにしている。藤根らの設計した同位体分離プラントは、本来、加圧水型軽水炉（以下PWR）で使用するための<sup>7</sup>Li 99.9%濃縮リチウムの生産用に設計されたものであるが、これを<sup>6</sup>Li濃縮プラントとみなしてE Iを求める。設計では分離係数を1.0075としている。藤根らが評価した原材料の消費量から<sup>7</sup>Li 1 t当たりの投入エネルギーは表2-6のようになる。同位体存在比から<sup>7</sup>LiのE Iを<sup>6</sup>Li 60%リチウムに換算すると、 $3.25 \times 10^{11}$  kcal/tを得る。

水銀アマルガム法による同位体分離プラントは岡本と藤井（1983）によって設計された。分離係数は、1.05として計算した。この方法による投入エネルギーを表2-7に示す。表2-7より<sup>6</sup>Li 60%リチウムのE Iは $3.74 \times 10^{10}$  kcal/tとなる。また、分離係数が1.06の場合には、 $3.15 \times 10^{10}$  kcal/tで、1.05の場合よりも、約19%小さくなる。以下の議論では、分離係数を1.05としたときのE Iの値が用いられている。

表2-6. <sup>7</sup>Liの濃縮に要するエネルギー（イオン交換法による）

材料またはエネルギー源		<sup>7</sup> Li 1トン当たり必要量	
種類	エネルギー・インテンシティ <sup>a</sup>	物量	エネルギー (10 <sup>6</sup> kcal)
LiOH <sup>b</sup>	$2.55 \times 10^8$ kcal/t-Li*	1.08 t-Li	275
電力	$2.45 \times 10^3$ kcal/kwh	$120 \times 10^3$ kwh	294
CH <sub>3</sub> COOH	$1.34 \times 10^7$ kcal/t <sup>+</sup>	193.43 t	2592
NaOH	$3.53 \times 10^6$ kcal/t <sup>+</sup>	5751.84 t	20304
HCl	$3.05 \times 10^6$ kcal/t <sup>+</sup>	6408. t	19544
イオン交換樹脂	$1.77 \times 10^5$ kcal/l-Resin <sup>+</sup>	5221. l-Resin	924
H <sub>2</sub> O	-	160.28 t	-
合計			43933

<sup>a</sup>E Iの出典は表2-3の注の分類と同じ。

<sup>b</sup>LiOHのE IはLiClのE Iに等しいと仮定した。

表2-7. <sup>6</sup>Li60%リチウムの濃縮に要するエネルギー（水銀アマルガム法による）

材料またはエネルギー源		<sup>6</sup> Li60% 1トン当たり必要量	
種類	エネルギー・インテンシティ <sup>a</sup>	物量	エネルギー (10 <sup>6</sup> kcal)
LiCl	$2.55 \times 10^8$ kcal/t-Li*	9.08 t-Li	2315
電力	$2.45 \times 10^3$ kcal/kwh	$1.43 \times 10^7$ kwh	35035
Hg	-	$2.04 \times 10$ t	-
合計			37350

<sup>a</sup>E Iの出典は表2-3の注の分類と同じ。

分子量の比からリチウムのE IをLiAlO<sub>2</sub>のE Iに換算すると下のようになる。

天然組成	$4.22 \times 10^7$ kcal/t
イオン交換法による濃縮	$3.18 \times 10^{10}$ kcal/t
水銀アマルガム法による濃縮	$3.66 \times 10^9$ kcal/t

次に、海水等からの抽出について検討する。単純に海水を蒸発させるとすると、1 tのリチウムを得るには  $4.1 \times 10^{12}$  kcal/tの蒸発エネルギーが必要である。現実には淡水化プラント（日本海水学会、1977）にみられるように減圧による沸点降下、多段階気化、イオン交換、透析など熱によらない濃縮を併用して、エネルギー投入を減らしている。淡水化プラントの副産物としてリチウムを分離するとすると、E Iは  $2.2 \times 10^{11}$  kcal/tとなる。Steinberg and Dangは、池に導いた海水を太陽熱で蒸発させるという塩田方式によるリチウム抽出法を提案している。太陽エネルギーを無視して、この塩田方式のプラントで消費される電力（主に濃縮液から固体LiClを取り出すための蒸発エネルギーと電解エネルギー）だけを考慮するならばE Iは  $2.0 \times 10^8$  kcal/tとなる。未来工学研究所は200 ppmのリチウムを含む鹹水から抽出する場合の製造プロセスを設計している。鹹水から抽出する場合にはE Iは  $2.86 \times 10^8$  kcal/tとなる。さらに、日本には海水に比べて100倍以上リチウムが濃縮した温泉水がある。例えば、鹿塩温泉では濃度が平均54 ppmである（高松ら、1980）。上の鹹水からの抽出プロセスをこの温泉水に適用するとするとE Iは  $3.4 \times 10^8$  kcal/tとなる。武内（1983）は、海水に金属アルミニウム（アルミ箔）を浸漬した場合に生じる腐食生成物が、海水中のリチウムを選択的に抽出するという作用を利用することを提案している。抽出に要するアルミニウムの量を、武内の報告中の、リチウム抽出量が0.013 mgのときアルミニウムの腐食量が6.8 mgであることより算出し、また、腐食生成物からのリチウムの抽出には、上の未来工学研究所による鹹水からの抽出プロセスを仮定するとすると、この場合のE Iは、 $2.3 \times 10^{10}$  kcal/tとなる。ただし、この内の99%はアルミニウムへの投入エネルギーである。以上のリチウムのE Iをまとめると表2-8のようになる。

リチウム資源の確保に関連して他方面へ及ぼす影響も資源・経済アセスメントの立場から重要である。表2-6に示すようにイオン交換法による濃縮では薬品が投入エネルギーの大部分を占めているが、例えば、<sup>6</sup>Li 60%リチウム1 t当たり  $4.7 \times 10^4$  tの塩酸が消費される。STARFIREの稼働期間を30年とすれば、年間6 t (=178 t ÷ 30年)のリチウムが必要であるから、イオン交換法によればSTARFIRE 1基当たり年間  $2.8 \times 10^5$  tの塩酸が必要となる。これは、1980年の塩酸の国内生産量  $5.3 \times 10^5$  tの1/2に相当する。水銀アマルガム法による場合では、水銀汚染の防止が課題となる。リチウムの海水抽出の過程でNaCl、KCl、Mgなどの塩も同時に得られるが、その生産量を未来工学研究所が予測している。100 tのリチウムを海水から取り出すとした場合に、同時に抽出される物質の量を1980年の日本の輸入量と比較して表

2-9に示す。核融合のためのリチウム資源確保が他産業の需給構造を一変させてしまう可能性があり、その影響を考慮しておく必要がある。

表2-8. リチウムのエネルギー・インテンシティー

原料または方法	E I ( $10^9$ kcal/t)
海水蒸発	4100.
海水淡水化プラント	220.
塩田方式	0.20
鹹水	0.286
温泉水	0.34
金属Alによる海水からの抽出	23.
リチウム鉱石	0.402
イオン交換法による濃縮	325.
水銀アマルガム法による濃縮	37.4

表2-9. 海水からの抽出量と1980年の輸入量

物質	海水からの抽出量 (t)	輸入量 (t)
NaCl	$2.0 \times 10^7$	$7.5 \times 10^6$
KCl	$5.2 \times 10^5$	$1.3 \times 10^6$
Mg	$2.0 \times 10^5$	$1.3 \times 10^4$
Li	$1.0 \times 10^2$	$5.7 \times 10^2$

## 2-5. 核融合炉のエネルギー収支

概念設計STARFIREの主なパラメータを表2-10に示す。表2-2の材料インベントリー表と表2-3の材料のEIから求めた炉設備部分の材料への投入エネルギーを表2-11に示す。また、表2-4のEIからSTARFIREへの初期投入エネルギーを求めると表2-12のようになる。表2-11、2-12に示すように、トリチウム増殖材に関する選択は全体の投入エネルギーに大きく影響する。STARFIREの特徴の一つに、運転モードとして定常運転を仮定していることがあるが、これにより、第一壁の寿命は6年と長く、ブランケットの更新頻度が小さくなっている。このため、ブランケット構造材のPCAへの投入エネルギーは初期投入で $18 \times 10^9$  kcal、更新部分を含めても $155 \times 10^9$  kcalで全体に比べて小さい。Case1では超電導線材への投入が大きく( $724 \times 10^9$  kcal)、炉設備材料全体への投入の45%を占める。

表2-10. STARFIRE炉の主なパラメータ

熱出力(MW <sub>t</sub> )	4000
全電力(MW <sub>e</sub> )	1440
純電力(MW <sub>e</sub> )	1200
主半径 (m)	7.0
副半径 (m)	1.94
炉高 (m)	28.6
中性子壁負荷(MW/m <sup>2</sup> )	3.6
第一壁構造材	PCA
第一壁寿命 (年)	6
トリチウム増殖材	α-LiAlO <sub>2</sub>
トリチウム・インベントリー (kg)	11.6
燃焼率 (%)	42
運転モード	定常

表2-11. STARFIREの炉設備材料への投入エネルギー  
単位は10<sup>9</sup> kcal(%)。

	Case 1	Case 2-1	Case 2-2
第一壁・ブランケット	98 ( 6)	19316 ( 93)	2249 ( 60)
内増殖材	26 ( 2)	19287 ( 93)	2220 ( 59)
シールド	584 ( 37)	584 ( 3)	584 ( 16)
マグネット	902 ( 56)	902 ( 4)	902 ( 24)
支持構造	15 ( 1)	15 ( 0)	15 ( 0)
合計	1599 (100)	20817 (100)	3750 (100)

表2-12. STARFIREへの初期投入エネルギー  
単位は10<sup>9</sup> kcal(%)。

	Case 1	Case 2-1	Case 2-2
炉設備			
材料	1599 ( 26)	20817 ( 82)	3750 ( 45)
製造	1438 ( 23)	1454 ( 6)	1454 ( 17)
小計	3037 ( 49)	22271 ( 88)	5204 ( 62)
その他の設備			
材料	701 ( 11)	701 ( 3)	701 ( 8)
製造	495 ( 8)	495 ( 2)	495 ( 6)
小計	1196 ( 19)	1196 ( 5)	1196 ( 14)
建屋	1421 ( 23)	1421 ( 6)	1421 ( 17)
資材輸送	389 ( 6)	389 ( 2)	389 ( 5)
土地造成	163 ( 3)	163 ( 1)	163 ( 2)
合計	6206 (100)	25440 (102)	8373 (100)

未来工学研究所はトカマク炉のUWMAK-II (純電力1716MW。) およびUWMAK-III (純電力1985MW。) を対象にエネルギー分析を行っている。UWMAK-IIと比較してUWMAK-IIIは小型化、軽量化を図る一方で、熱電変換効率を上げるために高温運転を行うように設計していることが特徴である。高温運転のために316ステンレス鋼のEIの約10倍の大きさのEIをもつTZMを構造材として使用しており、このためにUWMAK-IIIでは投入エネルギーは増大し、結果的に全体の投入エネルギーは、UWMAK-II、UWMAK-IIIでそれぞれ $7128 \times 10^9$  kcal、 $8323 \times 10^9$  kcalとなって発電効率の上昇を相殺している。

初期投入エネルギーは表2-4から求められる。運転期間中の投入エネルギーに関しては、核融合炉プラントの年間の保守・更新に要するエネルギーを初期投入の2%と仮定する。また、プラントの稼働年数は30年とする。トリチウム処理、廃棄物処理、ペレット製造などの重要な項目は表2-4には含まれていないが、Tsoulfanidisのエネルギー分析によると、これらへの投入エネルギーは全体の10%以下と考えられる。

本研究でエネルギー分析を行った核融合炉の概念設計とその結果を表2-13に示す。表2-13中の総投入エネルギーは、初期投入に保守・更新に要するエネルギーを加えたものである。NUWMAK (Badgerら、1979)とSPTR (swimming pool type reactor; 日本原子力研究所、1983)はトカマク炉、WITAMIR-I (Badgerら、1980)はタンデム・ミラー炉、HIBLIC-I (Yamakiら、1984)は重イオン慣性核融合炉、WILDCAT (Argonne National Laboratory、1981)はトカマク型触媒D-D (catalyzed deuterium-deuterium) 核融合炉である。また、STARFIREについてはCase1が表2-13に示してある。表2-13から、磁場閉じ込め核融合では初期投入エネルギーの42~54%を炉設備への投入エネルギーが占める。また、慣性閉じ込め核融合ではドライバー・システムが初期投入の41%を占める。

表2-13. 核融合炉のエネルギー収支

	NUWMAK	STARFIRE	SPTR	WITAMIR-I	HIBLIC-I	WILDCAT
純電力(MW <sub>e</sub> )	660	1200	1000	1530	1500	812
設備利用率(%)	80	75	75	80	75	75
総投入エネルギー(10 <sup>9</sup> kcal)	4446	9930	9920	13371	15725	23523
初期投入の内訳(%)						
炉設備	42	49	54	51	12	84
ドライバー・システム	—	—	—	—	41	—
その他の設備	22	19	17	19	15	6
輸送および建設	36	32	29	30	32	10
エネルギー比	26.8	20.5	17.1	20.7	16.2	5.9

ここで、エネルギー比 (R) を次のように定義する。

$$R = [\text{純電力} \times \text{稼働時間 (kcal)}] \div [\text{投入エネルギー (kcal)}] \quad (2-8)$$

表2-13のようにD-T炉ではエネルギー比は16.2~26.8となる。炉タイプの違いによるエネルギー比の差は認められない。NUWMAKのエネルギー比が他のD-T炉よりも高くなるのは、出力電力に比べて炉重量が小さいために炉設備の製造エネルギーが小さく計量されることによるところが大きい。D-D炉WILDCATでは、エネルギー密度が小さいために炉が大型化すること、また、特に強磁場を必要とするために超電導線材の使用量が増大することなどのために、出力エネルギーに比べて投入エネルギーが大きくなり、エネルギー比は5.9となる。WILDCATの初期投入エネルギーの53%は超電導線材が占める。ただし、表2-13に示したWILDCATの数値は定常運転の場合で、パルス運転の場合ではエネルギー比は6.2となる。

上の概念設計の超電導マグネットには、線材として、液体ヘリウム冷却によるNbTiあるいはNb<sub>3</sub>Snが想定されているが、1986年以降、高温超電導物質の開発が急速に進み、臨界温度が90Kを越える酸化物超電導体が確認されており(田中、1987)、超電導線材の選択は、今後流動的になる可能性がある。表2-11に示されているように、STARFIRE (Case 1) では、炉設備材料への投入エネルギーの内56%をマグネットが占めており、特に、超電導線だけで45%を占める。材料の加工に要するエネルギーは、重量ベースで算出しているため精度はよくないが、材料と加工とを合わせたマグネットへの投入エネルギーは、初期投入全体の22%程度となる。したがって、新しい超電導物質が開発された場合には、エネルギー比はこの程度の範囲で変わるものと考えられる。また、冷却剤に関しては、例えば、液体ヘリウムから液体窒素に代わった場合には、ヘリウムのEIは $5.0 \times 10^7 \text{ kcal/t}$  (未来工学研究所) であるため、全体の投入エネルギーに与える影響は小さい。

コイルに高温超電導物質を利用した概念設計の試みも行われており、Ehstら(1987)は、液体窒素冷却によるセラミック超電導物質をSTARFIRE設計に応用した場合について考察している。STARFIREのdirect capital costの内、マグネット関係は17%を占めるが、Ehstらは、セラミック超電導物質が実用化された場合には、全体で、6~8% capital costが減少する可能性があると報告している。

わが国の大学における次期大型核融合計画では、ヘリカル系環状磁場装置が選択された(藤原・飯吉、1988)。ステラレータ/ヘリオトロン炉の詳細な概念設計は入手できなかったが、ステラレータ炉UWTOR-M (Joint US-Euratom Report、1981)を参考にして特徴を簡単に検討してみることにする。UWTOR-M(熱出力5500MW<sub>t</sub>、主半径24.1m)は同じ環状系のトカマク炉STARFIRE(熱出力4000MW<sub>t</sub>、主半径7.0m)に比べて大型となる。UWTOR-M炉は18個のモジュール

からなっており、ブランケット・シールド・マグネットを含めたモジュール一つの重量は1400tであるから全体で25200tとなる。ただし、支持構造などの部分があるから炉重量はさらに増すと考えられる。特に、エネルギー分析の立場から、磁場閉じ込めでは超電導線材の使用量に注目する必要があると思われるが、コイルの蓄積エネルギーで比較すると、STARFIREの62GJに対し、UWTOR-Mでは190GJである。これはWILDCATの213GJに匹敵する大きさで、超電導線材が多量に使用される可能性がある。

リチウムの濃縮がエネルギー比に与える影響の感度分析を行った結果を核分裂炉の場合と比較して表2-14に示す。表2-14中のPWRのエネルギー比を求めるのに、稼働年数を30年、設備利用率を75%と仮定した。表2-14に示すように、リチウムの濃縮方法によって核融合炉のエネルギー比は大きく変わり、エネルギー分析の立場からみるとD-T反応を前提とする場合には核融合におけるリチウムは核分裂におけるウランと類似した役割を果たす。また、表2-14中のエネルギー比15.6を一般に核分裂炉のエネルギー比と考えるならば、表2-13のようにD-T核融合炉のエネルギー比は核分裂炉のものと同程度あるいはそれよりも大きくなる。

表2-14. リチウムを濃縮した場合のエネルギー比

濃縮法	STARFIRE			1000MW <sub>e</sub> PWR	
	—	水銀アマルガム法 <sup>a</sup>	イオン交換法	遠心分離法 <sup>b</sup>	ガス拡散法 <sup>c</sup>
濃縮率 (%)	天然	60	60	3.2	3.2
投入(10 <sup>9</sup> kcal)	9930	16505	67705	10378	35976
LiまたはUへの投入 (%)	1	40	85	67	84
エネルギー比	20.5	12.3	3.0	15.6	4.7

<sup>a</sup>分離係数を1.06とした場合には、投入エネルギーは、 $15449 \times 10^9 \text{ kcal}$ となる。その内、リチウムへの投入は36%で、エネルギー比は13.2となる。

<sup>b</sup>政策科学研究所(1977)より。

<sup>c</sup>U.S. Energy Research and Development Administration(1976)より。

以上の議論では、75%あるいはそれ以上の設備利用率を仮定している。STARFIREでは、保守が容易な設計であること、第一壁の寿命が6年以上であること、STARFIREは10台目の商業炉であることなどの仮定に基づいて75%の設備利用率を設定している。

自然エネルギー利用発電システムのエネルギー収支を概観しておくことはソフト・パス対ハード・パスの観点からも重要であろう。資源調査会(1982)が行ったエネルギー分析の結果をもとにまとめたのが表2-15である。ただし、(2-8)式で定義したエネルギー比を求めるために元のデータを修正してある。自然エネルギーは、一般に、クリーンで安全、かつ再利用可能な資源であり、また、発電所の建設にはあまり特殊な材料を必要としない。しかし、エネルギー密度が小さいこと、エネルギー源が安定に供給されないことなどのために自然エネルギー利用発電システムのエネルギー比は押し並べて小さい。現在のところ、水力および地熱エネルギー

だけが他のエネルギー資源と競争可能である。

表2-15. 自然エネルギー利用発電システムのエネルギー収支

エネルギー源	純電力 (KW <sub>e</sub> )	設備利用率 (%)	投入エネルギー (10 <sup>9</sup> kcal)	エネルギー比
水力	9 9 7 5	4 5	7 1. 1	1 4. 3
地熱	9 3 0 0	6 0	1 9 1. 9	6. 6
風力	9 0	4 0	1. 9	4. 3
波力 (海上式)	7 0 0	2 7	1 0 4. 2	0. 4
波力 (固定式)	7 0	4 1	1. 9	3. 4
潮流	2 1 0 0	5 0	7 8. 1	3. 0
海洋温度差	1 2 5 0	8 0	1 2 9. 6	1. 7
太陽熱 (タワー集光式)	4 5 0 0	1 6	1 9 9. 6	0. 8
太陽熱 (曲面集光式)	4 5 0 0	1 6	3 7 0. 6	0. 4
太陽光	9 0 0	8	6 7. 2	0. 2

## 2-6. 核融合・核分裂ハイブリッド炉のエネルギー分析

これまでに公表されているハイブリッド炉の概念設計で材料インベントリーの詳細がわかるものは皆無であるといつてよい。しかし、詳細な材料インベントリーが与えられていないシナリオ段階の概念設計の評価もサイエンス・アセスメントの立場からは重要である。ここでは純核融合炉 (特にSTARFIRE) との比較が容易な磁場閉じ込め方式を扱うこととし、Westinghouse Elec. Co. (1979) によるトカマク型ハイブリッド炉 (以下CTHRと呼ぶ) とBenderら (1978) によるミラー型ハイブリッド炉 (以下SMHRと呼ぶ) の二つの概念設計を取り上げる。CTHRおよびSMHRの詳細な材料インベントリーは得られないので、第一壁、ブランケット、シールド、マグネットのコンポーネント・レベルで、それぞれの体積から材料ごとの重量を推定して、投入エネルギーを求める。主なパラメータを表2-16に、初期投入エネルギーを表2-17に、それぞれSTARFIREと比較して示す。ただし、保守・更新を含めた総投入エネルギーは表2-16に示してある。表2-17のブランケットへの投入には核燃料生産の原料となるウランへの投入エネルギーも含まれている。ただし、ウランのEIは $5.22 \times 10^8 \text{ kcal/t}$ とした (Chapman, 1975)。例えば、CTHRでは第一壁・ブランケットへの投入の80%はウランへの投入が占めている。

ハイブリッド炉は二つの目的をもっている。すなわち、電力生産と他の核分裂炉のための燃料生産である。SMHRでは出力電力の2/3は所内電力 (主にプラズマ加熱) として消費されるため純電力は小さい。したがって、SMHRは燃料生産型である。燃料生産に関しては、CTHR、SMHRでそれぞれ次のようになっている。

CTHR: 約3000 tの天然ウランまたは減損ウランが30年の稼働期間中に消費され、4年毎に<sup>239</sup>Pu

が3%に濃縮した燃料が回収される。これにより、1000MW。LWR 8基分に相当する燃料をまかなう。

SMHR：30年間で約430tのウランを消費して1000MW。LWR 6基分の燃料を供給する。1.3年毎にブランケット内のウランを再処理して<sup>239</sup>Puだけを取り出し、残りはリサイクルさせる。

ただし、表2-17にはプルトニウムの処理に要するエネルギーは含まれていない。

表2-16. ハイブリッド炉の主なパラメータ

	CTHR	SMHR	STARFIRE
主半径 (m)	6.0	—	7.0
副半径 (m)	1.4	2.5 <sup>a</sup>	1.94
プラズマ体積(m <sup>3</sup> )	370	65	950
炉重量 (t)	10299	74366	24734
核融合出力(MW <sub>t</sub> )	1200	402	3510
全電力(MW <sub>e</sub> )	2195	1715	1440
純電力(MW <sub>e</sub> )	1980	603	1200
核燃料生産 (kg- <sup>239</sup> Pu/年)	2868	2016	—
設備利用率 (%)	70	74	75
総投入(10 <sup>9</sup> kcal)	11558	10809	9930

<sup>a</sup>プラズマ半径。

表2-17. ハイブリッド炉への初期投入エネルギー  
単位は10<sup>9</sup>kcal(%)。

	CTHR	SMHR	STARFIRE
炉設備	1577 (25)	2981 (44)	3037 (49)
内材料への投入			
第一壁・ブランケット	255 (4)	209 (3)	98 (2)
シールド	164 (3)	18 (0)	584 (9)
マグネット	575 (9)	1059 (16)	902 (15)
その他	0 (0)	152 (2)	15 (0)
小計	994 (16)	1438 (21)	1599 (26)
その他の設備	1824 (28)	1425 (21)	1196 (19)
建設・輸送	3007 (47)	2350 (35)	1973 (32)
合計	6408 (100)	6756 (100)	6206 (100)

ハイブリッド炉のエネルギー比を求める場合、ハイブリッド炉で生産された燃料を消費する核分裂炉の投入・出力エネルギーも考慮に入れるべきである。ここで、LWRとしてPWRを考えるならば、表2-14のように遠心分離法による場合には、1000MW。PWR (純電力954MW<sub>e</sub>) への投入10378 × 10<sup>9</sup> kcalの内

建設・運転に 33% (3427 × 10<sup>9</sup> kcal)

燃料に 67% (6951 × 10<sup>9</sup> kcal)

である。この場合、燃料はハイブリッド炉から供給されるのであるから、核分裂炉への投入エネルギーは  $10378 \times 10^9 \text{ kcal}$  の内の33%だけを考えればよい。CTHR 1基当たりLWR 8基分の燃料を供給するのであるから、総投入は、

$$(11558 + 3427 \times 8) \times 10^9 = 38974 \times 10^9 \text{ kcal}$$

となる。一方、発電量（総電力）は、

$$1980 + 954 \times 8 = 9612 \text{ MW。}$$

である。SMHRの場合も同様に計算される。結果として表2-18のようなエネルギー比を得る。エネルギー・コストから見ると、ハイブリッド炉と核分裂炉とを組み合わせる方が、それぞれ個別に考える場合よりも非常に有利であるといえる。ただし、以上の議論では核燃料の処理や輸送に要するエネルギーは無視されている。

表2-18. ハイブリッド炉のエネルギー収支

	CTHR + 8 LWR	SMHR + 6 LWR	CTHR のみ	SMHR のみ	LWR	STARFIRE
出力(MW <sub>e</sub> )	9612	6327	1980	603	954	1200
投入( $10^9$ kcal)	38974	31371	11558	10809	10378	9930
エネルギー比	41.8	34.2	27.1	9.3	15.6	20.5

〔第二章まとめ〕

以上をまとめると次のようになる。

- 1) D-T炉では、出力1000MW。あたり数百トンのリチウムを消費するため、リチウム資源を海外に依存するわが国ではその確保が重要な課題であるが、エネルギー分析からみても、リチウムのエネルギー・インテンシティーは他の材料に比べて一桁大きく、また、 $^6\text{Li}$ 濃縮や海水抽出を行う場合にはさらに二〜三桁大きくなるため、リチウムの消費を抑えた炉設計が望まれる。エネルギー消費を減らすような濃縮法、海水抽出法の開発も必要であるが、その際、他産業への影響も考慮しなければならない。
- 2) D-T炉への投入エネルギーの内、磁場閉じ込めでは炉設備が42〜54%を占め、また、慣性閉じ込めではドライバー・システムが41%を占める。D-T核融合炉のエネルギー比は16.2〜26.8となったが、炉タイプの違いによるエネルギー比の差は認められなかった。また、D-T炉のエネルギー比は核分裂炉のエネルギー比と同程度またはそれよりも大きく、したがって、エネルギー分析からみると核融合炉は核分裂炉と競争可能である。なお、D-D炉のエネルギー比は5.9〜6.2となった。
- 3)  $^6\text{Li}$ を濃縮したリチウムをトリチウム増殖材として使用する場合には、濃縮法によって投入エネルギーおよびエネルギー比が大きく変化し、核融合におけるリチウムは核分裂におけるウランと類似した役割を果たす。

この点ではリチウムは準燃料的な意味を持つ。

- 4) 核融合・核分裂ハイブリッド炉では、単純な核融合炉としてみた場合にはエネルギー比は9.3~27.1となり、電力生産、燃料生産のいずれを主にするかで差が大きい。ハイブリッド炉と核分裂炉とを組み合わせる場合には、エネルギー比は34.2~41.3となり、それぞれ個別に考えるよりも非常に有利になる。

〔第二章参考文献〕

- Argonne National Laboratory (1980) STARFIRE - a commercial tokamak fusion power plant study. ANL/FPP-80-1, Vol.1,2.
- Argonne National Laboratory (1981) WILDCAT : a catalyzed D-D tokamak reactor. ANL/FPP/TM-150.
- BADGER,B. et al. (1979) NUWMAK - A tokamak reactor design study. UWFD-330, Fusion Engineering Program, Nuclear Engineering Department, University of Wisconsin, Madison, WI, 753 pp.
- BADGER,B. et al. (1980) WITAMIR-I - A University of Wisconsin tandem mirror reactor design. UWFD-400, Fusion Engineering Program, Nuclear Engineering Department, University of Wisconsin, Madison, WI, 448 pp.
- BENDER,D.J. et al. (1978) Reference design for the standard mirror hybrid reactor. A joint report by Lawrence Livermore Laboratory and General Atomic Company, UCRL-52478/GA-A14796.
- BUENDE,R. (1981) Net energy balance of tokamak fusion power plants. IAEA, Third IAEA Technical Committee Meeting and Workshop on Fusion Reactor Design and Technology, Tokyo, 17 pp.
- BULLARD,C.W. and R.A.HERENDEEN (1975) Energy impact of consumption decisions. Proceedings of the IEEE, Vol.63, 484-493.
- CHAPMAN,P.F. (1975) Energy analysis of nuclear power stations. Energy Policy, Vol.3, 285-298.

- EHRST, D.A. et al. (1987) Application of high temperature ceramic superconductors (CSC) to commercial tokamak reactors. ANL/FPP/TM-214, Argonne National Laboratory, 24 pp.
- EPRI (1978) An appraisal of energy analysis. prepared by Criterion Analysis Incorporated for EPRI, California, USA.
- 藤根幸雄他 (1981) イオン交換法によるリチウム同位体分離プロセスの概要. 日本原子力研究所, JAERI-M9735, 45 pp.
- 藤原正巳・飯吉厚夫 (1988) 大学における次期大型ヘリカル装置計画. 日本原子力学会誌, Vol. 30, No. 6, 497-504.
- Joint US-Euratom Report (1981) Stellarators - status and future directions. IPP-2/254, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 110pp.
- 科学技術庁資源調査会 (1979) 衣・食・住のライフサイクルエネルギー, No. 69, 418 pp.
- 科学技術庁資源調査会 (1982) エネルギー収支からみた自然エネルギー利用技術の評価手法に関する調査報告. No. 88, 538 pp.
- 関西国際空港株式会社 (1985) 関西国際空港建設事業に係る環境影響評価準備書. 512 pp.
- 茅陽一 (1980) エネルギー・アナリシス. 電力新報社, 294 pp.
- KIM, S.K. et al. (1980) Energy Intensity of the Japanese Economic Activities in 1975 and Analysis of Energy Flow through the Industries. J. Earth Sci., Nagoya Univ., Vol. 28, 1-32.
- 松田亀三 (1979) リシウム鉱物資源. 地学雑誌, Vol. 88, No. 4, 36-51.
- 未来工学研究所 (1978) 核融合炉実現条件に関する調査分析.
- 日本原子力研究所 (1983) トカマク型動力炉システムの概念検討 (スイミングプール型). JAERI-M83-120, 545 pp.
- 日本海水学会 (1977) 海水淡水化トータルシステムの評価調査報告書. 527 pp.
- 岡本眞實, 藤井靖彦 (1983) 水銀アマルガム法によるリチウム同位体分離. 東京工業大学原子炉工学研究所, 私信.
- 政策科学研究所 (1977) エネルギー利用構造とエネルギー収支に関する調査. CR-76-12, 215 pp.

STEINBERG, M. and V. DANG (1975) Preliminary design and analysis of a process for the extraction of lithium from seawater. Brookhaven National Laboratory, BNL 20535-R, 34 pp.

高松信樹他 (1980) 食塩泉のリチウム. 地球化学, Vol. 14, 35-42.

武内文児 (1983) 希薄溶液からのリチウムの抽出に関する研究. 金属材料技術研究所研究報告集4, 240-248.

田中昭二 (1987) 酸化物高温超伝導体. 学術月報, Vol. 40, No. 12, 871-876.

TSOULFANIDIS, N. (1981) Energy analysis of coal, fission, and fusion power plants. Nuclear Technology/Fusion, Vol. 1, 238-254.

U.S. Energy Research and Development Administration (1976) A National Plan For Energy, Development & Demonstration. ERDA 76-1, 111-116.

Westinghouse Electric Corporation (1979) Status report on the conceptual design of a commercial tokamak hybrid reactor (CTHR). WFPS-TME-79-022.

YAMAKI, T. et al. (1984) HIBLIC-I - conceptual design of heavy ion fusion reactor. IPPJ-663, Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ.

### 3. リスク・アセスメント

#### 3-1. 安全解析

現在の段階における核融合炉の概念設計は、定量的分析が行えるほど詳細ではない。また、核分裂炉の場合のように、安全評価指針に基づき、事故のシナリオを与えて安全解析を行うことは不可能である。従って、リスク・アセスメントでは特定の概念設計を取り上げることはせず、安全性に関する制約条件や配慮事項を提示することを目標とする。特に、社会的適合性の観点から、周辺公衆へ及ぼす影響を評価することに重きをおくことにする。本章では、核融合炉として主にD-T (deuterium-tritium) 炉を想定しているが、D-D (deuterium-deuterium) 炉も考慮する。

核融合炉システムには、リスクの要因として放射性物質（中性子による放射化材料とトリチウム）とエネルギー源（熱エネルギーと電磁エネルギー、また、設計によっては化学エネルギーも含まれる）が存在する。純電力1000MW。核融合炉一基当たりの放射性物質とエネルギーの存在量を表3-1に示す。ただし、表3-1中の値はトカマク炉の概念設計STARFIRE (Argonne National Laboratory、1980) に基づいている。

表3-1. 1000MW。核融合炉プラント1基当たりの放射能とエネルギーの存在量

	トリチウム (MCi)	誘導放射能 (MCi)	熱エネルギー (GW)	電磁エネルギー (GJ)
プラズマ (真空ポンプ含む)	1		3	1
ブランケット・第一壁	100	6000	3	
マグネット				100
一次冷却系		0.03		
トリチウム処理系	5			
貯蔵	10			

表3-2. 安全性からみた核融合炉と核分裂炉の特徴

	核融合	核分裂
放射能とエネルギー 熱交換事故 重要なリスク 放射性廃棄物	システム中に分散 冷却材喪失事故 平常運転時のトリチウム 放射化材料	炉心に集中 冷却材喪失事故 事故時の放射性物質 核分裂生成物とアクチノイド

核融合炉システムの安全性に関する特徴を核分裂炉の場合と比較して表3-2に示す。両者の最も大きな違いは、核分裂炉では放射性物質、エネルギー源がともに炉心部分に集中しているのに対し、核融合炉では放射性物

質、エネルギー源がいずれも多くのサブシステムに分散していることである。従って、核融合炉システムは、ある一つのサブシステム内で起こった放射性物質あるいはエネルギーの漏洩事故が引き金となって他のサブシステムに事故が波及していく、いわゆる common-mode 事故に陥りやすい。直接発電を考えなければ核分裂炉と同様に核融合炉でも冷却材喪失事故が重要で、冷却材喪失事故発生により崩壊熱のため周囲の材料が溶解し、システムの健全性が失われる可能性がある。周辺公衆への安全性から、核分裂では事故時の放射性物質の放出が最も重大であるのに対し、核融合では平常運転時のトリチウム漏洩が最も重要である。放射性廃棄物に関しては、核分裂炉では使用済み燃料が重要であるが、核融合炉では炉設備からの大量の放射化材料が重大な問題となる。

### 3-2. 誘導放射能

炉材料は核融合反応からの中性子 (D-T反応では 14 MeV、D-D反応では 2.45 MeV) による中性子束に晒され放射化する。この誘導放射能の放射能レベルは一基の核融合炉で生産、貯蔵されるトリチウムよりも一桁大きく、放射化材料に関してシステムの保守、廃棄物処理、事故時の漏洩などの問題が生じる。

表 3-3. 核融合炉概念設計の主なパラメータ

	NUWMAK	STARFIRE	WITAMIR-I	MARS	SOLASE	HIBALL (1キャビティ -)	WILDCAT
熱出力 (MW <sub>t</sub> )	2097	4000	3000	2811	3340	2558	2915
純電力 (MW <sub>e</sub> )	660	1200	1530	1200	1000	942	812
中性子壁負荷 (MW/m <sup>2</sup> )	4	3.6	2.4	4.3	5	4.5	0.6
ブランケット構造材	Ti-6Al-2Sn -4Zr-2Mo	PCA	HT-9	HT-9	Al-6061	HT-9	PCA
構造材寿命 (年)	2	6	5	5	1	2	20
構造材の初期投入量 (t)	46.4	450	1089	197	57.5	81	3727
炉重量 (t)	6682	25011	42979	15914	10694	18803	58358

これまでに発表されている商業用核融合炉の概念設計の主なパラメータを表 3-3 に示す。NUWMAK (Badgerら、1979) と STARFIRE はトカマク炉、WITAMIR-I (Badgerら、1980) と MARS (Loganら、1984) はタンデム・ミラー炉、SOLASE (Connら、1977) はレーザー核融合炉、そして、HIBALL (Badgerら、1981) は重イオンビーム慣性核融合炉で、以上は D-T 炉である。また、WILDCAT (Argonne National Laboratory、1981) はトカマク型触媒 D-D 炉である。これらの概念設計の運転停止後の放射能の総量を表 3-4 に、また、全放射能に占める割合の最も大きい放射性核種を表 3-5 にそれぞれ示す。表 3-5 で、STARFIRE の欄の <sup>55</sup>Fe と <sup>63</sup>Ni は、ブランケット構造材の PCA (prime candidate alloy; titani

um-modified 316 ステンレス鋼) の主成分である鉄とニッケルから生じる。また、MARS、WITAMIR-I および HIBALL の欄の  $^{56}\text{Mn}$  と  $^{55}\text{Fe}$  はブランケット構造材 HT-9 中の鉄成分から生じ、 $^{93}\text{Mo}$  と  $^{92}\text{Nb}$  は同じく HT-9 中のモリブデンから生じる。WILDCAT では STARFIRE と同じく PCA がブランケット構造材として使われている。表 3-4 のように 0~10 年までは STARFIRE と同様の減衰傾向を示すが、100 年後 (50 年以降) において違いが生じるのは、2.45 MeV の中性子起源による  $^{63}\text{Ni}$  発生によるところが大きい。

表 3-4. 運転停止後の誘導放射能  
単位は MCi。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
STARFIRE	6100	890	78	0.29
MARS	7900	500	34	0.094
WITAMIR-I	3000	380	53	0.24
HIBALL (1ヶ+ビティ)	1600	23	2.6	0.19
NUWMAK	1200	150	0.026	0.0035
SOLASE	1300	0.073	0.0025	$8.9 \times 10^{-6}$
WILDCAT	6200	1700	200	23

表 3-5. 運転停止後の誘導放射能中で支配的な核種

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
STARFIRE	- <sup>a</sup>	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{63}\text{Ni}$
MARS	$^{56}\text{Mn}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{93}\text{Mo}$ , $^{92}\text{Nb}$ <sup>b</sup>
MITAMIR-I	$^{56}\text{Mn}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{93}\text{Mo}$ , $^{92}\text{Nb}$ <sup>b</sup>
HIBALL	$^{56}\text{Mn}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{93}\text{Mo}$ , $^{92}\text{Nb}$ <sup>b</sup>
NUWMAK	$^{185}\text{W}$ <sup>c</sup>	$^{185}\text{W}$ <sup>c</sup>	$^{55}\text{Fe}$ <sup>d</sup>	$^{93}\text{Mo}$ , $^{93\text{m}}\text{Nb}$ <sup>b</sup>
SOLASE	$^{16}\text{N}$ <sup>e</sup>	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{14}\text{C}$ <sup>f</sup>
WILDCAT	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{55}\text{Fe}$	$^{63}\text{Ni}$

<sup>a</sup>計量せず。

<sup>b</sup>モリブデン成分から。

<sup>c</sup>シールド中のタングステン成分から。

<sup>d</sup>不純物の鉄から。

<sup>e</sup>トリチウム増殖材  $\text{Li}_2\text{O}$  中の  $^{16}\text{O}$  から。

<sup>f</sup>グラファイトから。

biological hazard potential (以下BHP) は、存在するそれぞれの放射性核種を定められた最大許容濃度 (MPC; U. S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)、1975) まで稀釈するのに要する空気または水の量の合計として定義され、BHP値は、放射

性物質が環境へ放出された場合に呼吸や食物摂取による生物学的影響の目安を与えてくれる。核融合炉の停止後のBHP-air（空気に対するBHP）の値を表3-6に示す。BHPは放射性核種の毒性を反映するが、表3-6の減衰傾向は表3-4の放射能の場合とよく一致している。表3-6でSTARFIREの停止直後のBHPの値は、中性子増倍材の $Zr_5Pb_3$ 中で発生する $^{89}Zr$ が大部分を占める。

停止後の崩壊熱もまた重要であるが、その値を表3-7に示す。表3-7には1100MW<sub>e</sub>LWR（軽水型原子力発電所）の崩壊熱の値（U. S. Atomic Energy Commission、1973）も示してある。核分裂炉では停止時の崩壊熱は熱出力の数パーセントに達するが、核融合炉ではこれよりも小さい。表3-4、3-5、3-6および3-7から、D-T炉では誘導放射能の発生量はブランケット構造材の選択に強く依存し、アルミニウム合金のような低放射化材料の使用が望まれる。また、表3-4のSTARFIREとWILDCATとの比較から、中性子エネルギーの違いによって質的に異なる誘導放射能が発生する可能性があるため、D-D炉におけるブランケット構造材選択の検討が必要である。

表3-6. 運転停止後の空気に対するBHP  
単位は $10^6 km^3$ （空気）。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
STARFIRE	17000	230	33	0.11
MARS	470	62	1.3	0.037
WITAMIR-I	150	31	1.4	0.031
HIBALL (1キャビティ)	68	1.3	0.16	0.032
NUWMAK	240	9.4	0.0047	0.00095
SOLASE	39	0.022	0.00016	$4.1 \times 10^{-6}$

表3-7. 運転停止後の崩壊熱  
単位はMW<sub>t</sub>。括弧内の値は熱出力に対する割合を表わす。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
STARFIRE	88 (2.2%)	40	1.3	0.14
MARS	120 (4.3%)	1.2	0.42	0.010
WITAMIR-I	24 (0.8%)	2.2	0.23	0.012
HIBALL (1キャビティ)	20 (0.8%)	1.8	0.0087	0.00067
NUWMAK	7.2 (0.3%)	2.8	0.031	$1.8 \times 10^{-5}$
SOLASE	52 (1.6%)	0.14	0.00020	$1.9 \times 10^{-6}$
WILDCAT	39 (1.3%)	-	-	-
1100MW <sub>e</sub> LWR	230 (6.8%)	17	0.66	0.067

核融合炉で年間発生する放射性廃棄物の量を核分裂炉の場合と比較して表3-8に示す。ただし、表3-4、

3-6、3-7にみられるように六つのD-T炉の概念設計の中でSTARFIREが最も悪い結果となっているため、表3-8にはSTARFIREの場合が示されている。表3-8では、STARFIREで年間発生する260tのブランケット材料（PCA75tを含む）と、1000MW<sub>e</sub>LWRからの年間約35tの使用済み燃料の値とを比較している。使用済み燃料の放射能の初期データは天野（1973）およびBenedictら（1981）から採った。表3-8に示すように核融合の誘導放射能は核分裂生成物やアクチノイドよりも毒性は非常に小さいといえるが、それでも停止後10年間は核分裂の場合と同程度の放射能レベルが続く。表3-8の結果はKazimi（1983）のものによく一致している。また、D-D炉のWILDCATでは、構造材の寿命が20年と長いため、ブランケットの交換は運転開始20年後に一度に全部行うとしている。従って、交換の際に発生する廃棄物の放射能は表3-4の場合と同じになる。

上の七つの概念設計はすべて遠隔操作による保守作業を仮定しているが、炉の保守作業の容易さや設備利用率の観点から、炉建屋内に人が立ち入ることが出来る可能性は重要である。表3-9に示すようにNUWMAKとMARSを除く設計では停止後1日においてU. S. NRCによる作業者に対する基準の1時間当たり2.5mremを満たしており、すべてのシールドが取り付けられている状態ならば作業者が炉建屋内に立ち入ることが可能である。特に、慣性閉じ込め核融合炉のSOLASEとHIBALLでは、シールドが2~3.5mと厚く設計されているため（磁場閉じ込めではシールドの厚さは0.6~1.1mである）、停止直後でも作業者の立ち入りは可能である。

表3-8. 年間取り出される放射性廃棄物

	取り出し後の時間			
	0年	1年	10年	100年
放射能 (MCi)				
STARFIRE	1000	150	13	0.048
1000MW <sub>e</sub> LWR	810	69	15	1.6
BHP-air [10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> (空気)]				
STARFIRE	2800	38	5.5	0.018
1000MW <sub>e</sub> LWR	4100	3300	2800	1400
BHP-water [km <sup>3</sup> (水)]				
STARFIRE	96000	590	85	4.3
1000MW <sub>e</sub> LWR	120000	14000	9500	1000

表3-9. 運転停止後1日におけるシールド外側での被曝線量率

	m r e m / 時
NUWMAK	2. 6
STARFIRE	0. 46
WITAMIR-I	0. 74
MARS	1.4
SOLASE	$3.8 \times 10^{-7}$
HIBALL	$< 4.7 \times 10^{-5}$
WILDCAT	1. 0

炉設備中の放射化材料はかなり大量となり、核融合炉プラントの稼働期間が終了した後の施設の解体撤去時には放射性廃棄物の処理が重大な問題となると考えられるので、以下で核融合炉の廃止措置について検討する。STARFIRE設計をD-T炉のreference designとして選ぶことにして、STARFIREおよびWILDCATの炉設備から出る放射性廃棄物の量を表3-10に示す（炉重量が表3-3の値よりも小さいのは、主に支持構造の中で含まれていない部分があるためである。）。放射性廃棄物はその放射能レベルによって次のように三段階に分類することにする。

高レベル廃棄物 (HLW)	$> 10^4$	Ci/m <sup>3</sup>
中レベル廃棄物 (MLW)	$10^{-1} \sim 10^4$	Ci/m <sup>3</sup>
低レベル廃棄物 (LLW)	$< 10^{-1}$	Ci/m <sup>3</sup>

この分類はSTARFIREにおけるものと同じである。現在、商業用原子力発電所の廃止措置の方式および方法について技術的かつ経済的観点から議論がなされているが、松尾（1985）によれば、廃止措置の標準工程としては密閉管理の後の解体撤去方式が好ましく、密閉管理による安全貯蔵期間は5～10年程度とするのが適当であるという。表3-10には、運転停止後の冷却期間を1年または10年としたときの炉設備からの放射性廃棄物の量がそれぞれ示されている。表3-4の放射能の減衰に比べると、表3-10-1および表3-10-2中の放射能レベルが高い廃棄物（HLW、MLW）の冷却後1年と10年の間の減少量は著しくはない。

放射性廃棄物と非放射性廃棄物とを区分する境界値を明確化することは廃棄物の処理および管理費用の低減や資源の再利用の必要性から重要である（吉田、1979）が、現在、わが国においては区分境界値は具体的には定められてはいない。本研究では、区分境界値を $10^{-4}$  Ci/tと仮定し、区分境界値を設定した場合の放射性廃棄物の量を表3-10の括弧の中に示す。表3-10-1および表3-10-2から、区分境界値を設定した場合には、シールドより外側にある炉設備の廃棄物発生量が著しく減少することがわかる。STARFIREに関して、TFマグネットの部分では、区分境界値を設定すると、冷却後1年では重量比で全廃棄物の19%を占めるが、10年後では5%になる。また、冷却後10年において超電導線材（約140t）の90%が再利用可能となる。 $10^{-4}$  Ci/tの区分境界値を仮定するならば、冷却後10年で体積、重量共に全体の放射性廃棄物

はほぼ半減する。しかし、それでも1400m<sup>3</sup>あるいは9300tの放射性廃棄物が解体撤去時に炉設備から発生する。一方、WILDCATでは、超電導線材（約4500t）が再利用可能となるためには10年以上必要となる。区分境界値を設定すると、放射性廃棄物は冷却後10年において、体積で2800m<sup>3</sup>、重量で21000t発生し、STARFIREの場合の2倍となる。

表3-10. 解体撤去時に炉設備から発生する放射性廃棄物の量  
括弧内の値は区分境界値として10<sup>-4</sup>Ci/tを仮定した場合のもの。

表3-10-1. STARFIREから発生する放射性廃棄物

	体積 (m <sup>3</sup> )		重量 (t)	
	運転停止後の冷却期間		運転停止後の冷却期間	
	1年	10年	1年	10年
第一壁・ブランケット				
高レベル廃棄物	94	57	778	450
中レベル廃棄物	178	215	607	935
低レベル廃棄物	102 ( 102)	102 ( 102)	164 ( 164)	164 ( 164)
小計	374 ( 374)	374 ( 374)	1549 ( 1549)	1549 (1549)
シールド				
高レベル廃棄物	31	23	247	184
中レベル廃棄物	728	374	4824	3460
低レベル廃棄物	596 ( 494)	958 ( 519)	3750 ( 3494)	5177 (3611)
小計	1355 (1253)	1355 ( 916)	8821 ( 8565)	8821 (7255)
TFマグネット				
中レベル廃棄物	28	28	227	227
低レベル廃棄物	757 ( 283)	757 ( 26)	5941 ( 2226)	5941 ( 206)
小計	785 ( 311)	785 ( 54)	6168 ( 2453)	6168 ( 433)
OH/EFマグネット				
低レベル廃棄物	57 ( 0)	57 ( 0)	396 ( 0)	396 ( 0)
支持構造				
中レベル廃棄物	9	9	70	70
低レベル廃棄物	149 ( 0)	149 ( 0)	281 ( 0)	281 ( 0)
小計	158 ( 9)	158 ( 9)	351 ( 70)	351 ( 70)
炉設備全体				
高レベル廃棄物	125	80	1025	634
中レベル廃棄物	943	626	5728	4692
低レベル廃棄物	1661 ( 879)	2023 ( 647)	10532 ( 5884)	11959 (3981)
総計	2729 (1947)	2729 (1353)	17285 (12637)	17285 (9307)

表3-10-2. WILDCATから発生する放射性廃棄物

	体積 (m <sup>3</sup> )		重量 (t)	
	運転停止後の冷却期間		運転停止後の冷却期間	
	1年	10年	1年	10年
第一壁・ブランケット 高レベル廃棄物 中レベル廃棄物 小計	474 4 478 (478)	474 4 478 (478)	3727 7 3734 (3734)	3727 7 3734 (3734)
シールド 高レベル廃棄物 中レベル廃棄物 低レベル廃棄物 小計	105 1276 197 (86) 1578 (1467)	3 1135 440 (259) 1578 (1397)	1338 8999 779 (496) 11116 (10833)	24 9415 1677 (918) 11116 (10357)
マグネット 中レベル廃棄物 低レベル廃棄物 小計	387 1957 (1706) 2344 (2093)	387 1957 (558) 2344 (945)	2951 13813 (12947) 16764 (15898)	2951 13813 (3725) 16764 (6676)
炉設備全体 高レベル廃棄物 中レベル廃棄物 低レベル廃棄物 総計	579 1667 2154 (1792) 4400 (4038)	477 1526 2397 (817) 4400 (2820)	5065 11957 14592 (13443) 31614 (30465)	3751 12373 15490 (4643) 31614 (20767)

上の結果を核分裂炉と比較するため、廃止措置に伴って核分裂炉から発生する放射性廃棄物の量を表3-11に示す。表3-11のデータはBardtenschlagerら(1978)から採った。Bardtenschlagerらの計算では、1200MW<sub>e</sub> BWR(沸騰水型軽水炉)と1200MW<sub>e</sub> PWR(加圧水型軽水炉)の原子炉圧力容器と内部構造物を対象にしており、稼働期間が25年の場合のものを表3-11に示した。表3-10、3-11-1、3-11-2から、核融合炉からの放射性廃棄物の発生量は核分裂炉の場合よりも一桁大きい。STARFIREでは、 $10^{-4}$  Ci/tの区分境界値を設定した場合には、冷却後10年におけるHLW、MLW、LLWの割合は、重量百分率でそれぞれ7、50、43%となる。また、1200MW<sub>e</sub> BWRでは、それぞれ13、79、8%で、1200MW<sub>e</sub> PWRでは、それぞれ20、61、19%である。Bardtenschlagerらによれば、BWR、PWR共にコンクリート生体遮蔽も放射化され、その量は430tである。さらに、BWRの一次冷却系、タービン施設、補助施設から発生する放射能汚染物の量は4450t、また、PWRでは3350tである。

表3-11. 解体撤去時に核分裂炉から発生する放射性廃棄物の量  
括弧内の値は区分境界値として $10^{-4}$ Ci/tを仮定した  
場合のもの。

表3-11-1. 1200MW。BWRから発生する放射性廃棄物

	体積 (m <sup>3</sup> )		重量 (t)	
	運転停止後の冷却期間		運転停止後の冷却期間	
	1年	10年	1年	10年
高レベル廃棄物	8	8	63	63
中レベル廃棄物	51	49	400	386
低レベル廃棄物	72 (3)	74 (5)	564 (25)	578 (39)
合計	131 (62)	131 (62)	1027 (488)	1027 (488)

表3-11-2. 1200MW。PWRから発生する放射性廃棄物

	体積 (m <sup>3</sup> )		重量 (t)	
	運転停止後の冷却期間		運転停止後の冷却期間	
	1年	10年	1年	10年
高レベル廃棄物	13	13	107	107
中レベル廃棄物	44	41	343	319
低レベル廃棄物	39 (17)	42 (13)	309 (135)	333 (100)
合計	96 (74)	96 (67)	759 (585)	759 (526)

移動性のある誘導放射能としては、一次冷却材中の腐食物が考えられ、STARFIREで $3.2 \times 10^4$  Ci (44 kg)、WILDCATで $2.7 \times 10^3$  Ci (36 kg) であるとしている。ただし、冷却材喪失事故の場合においても、腐食物が直接放出されるのは炉建屋内であるから、環境へ放出されるのはこれらの量の1/10程度であるとしている。放射化材料の事故時の環境への放出については次のトリチウムの項で議論する。

### 3-3. トリチウム

水素の放射性同位体で12.3年という比較的長い半減期を持つトリチウムは、D-T核融合を目指す限り不可欠で、核融合炉プラントには大量のトリチウムが存在することになる。また、D-T炉に比べて少量ながら、触媒D-D炉においてもトリチウムは存在する。トリチウムは呼吸や食物摂取によりHTOの形で容易に生体内に入り込むことができるため、トリチウムによる被曝は核融合炉の安全上重要な問題である。加えて、トリチウムは材料中を透過する性質を持つために、その封じ込めが課題となるが、一定量の環境中への漏洩は不可避と考

えられる。

(1) トリチウムの漏洩

D-T炉の場合、核融合炉プラント中のトリチウム・インベントリーは、表3-12に示すように核融合出力、燃焼率、トリチウム増殖比などのパラメータに依存する。磁場閉じ込みでは燃料供給量の1日分が貯蔵され、また、慣性閉じ込みではペレット製造のために供給量の2~5日分が貯蔵される。NUWMAKは燃焼率が他の設計と比べて一桁小さいために、核融合出力は最小であるにもかかわらず、トリチウム・インベントリーは最大となっている。1日あたりのトリチウム処理量は、ブランケット回収系と燃料回収系とを合わせて1~20 kg/dあるいは $10^7 \sim 2 \times 10^8$  Ci/d ( $1 \text{ g-T} \approx 10^4 \text{ Ci}$ ) 程度に設定しており、この値を達成するには漏洩量を処理量の $1/10^6$ 以下にしないてはならない。表3-12にはD-D炉WILDCATの場合も示されているが、プラント内のトリチウムは36~49 gで、D-T炉の場合の1/50以下となっている。

表3-12. 核融合炉のパラメータとトリチウム・インベントリー

	NUWMAK	STARFIRE	WITAMIR-I	MARS	SOLASE	HIBALL (4ヶペティ)	WILDCAT
核融合出力(MW <sub>t</sub> )	1792	3510	3000	2600	3000	8000	2154
燃焼率(%)	1.5	42	22	14	41	29	90 <sup>a</sup>
トリチウム増殖比	1.54	1.04	1.07	1.15	1.33	1.25	-
トリチウム処理量(kg/d)	20	1.3	2.2	2.9	1.3	4.4	0.01
トリチウム処理量(MCi/d)	200	13	22	29	13	44	0.1
トリチウム漏洩量(Ci/d)	<10	~13	~10	~15	~7	10	0.3
トリチウム存在量(kg)							
ブランケット	0.1	10.0	0.1	0.01	1.0	0.03	0.0
燃料サイクル	2.0	0.6	0.5	0.2	4.5	4.6	0.016 <sup>b</sup>
貯蔵	19.4	1.1	2.1	2.8	5.8	8.2	0.02
合計	21.5	11.7	2.7	3.0	11.3	12.8	0.036

<sup>a</sup> トリチウムの燃焼率。重水素および<sup>3</sup>Heの燃焼率は、それぞれ17%および12%。

<sup>b</sup> 定常運転の場合。パルス運転では0.029 kgとなる。

冷却系から蒸気発生器との間の壁を通して蒸気中に至るトリチウムの透過経路はトリチウムの漏洩経路として最も重要で、一旦蒸気中に拡散したトリチウムは、環境中へ放出されると考えられる。そこで、トリチウムが固体ブランケット中から一次冷却系へ透過する場合(STARFIRE)と、冷却材を兼ねる増殖材中から蒸気発生器中へ透過する場合(WITAMIR-IとHIBALL)の二つについて検討する。

T<sub>2</sub>の1日当たりの透過量をφ(g/d)とすると、φは次の式で表わされる。

$$\phi = k \cdot P_m \cdot \frac{A}{t} \cdot (p_1^{\frac{1}{2}} - p_2^{\frac{1}{2}}) \quad (3-1)$$

ただし、 $k$  : 定数 [=3600×24×6/22400 g/cm<sup>3</sup>(STP)·sec/d]

$P_m$  : 透過率 [cm<sup>3</sup>(STP)/(cm·sec·atm<sup>1/2</sup>)]

$A$  : 透過面積 (cm<sup>2</sup>)

$t$  : 厚さ (cm)

$p_1$  : 上流側の $T_2$ の分圧 (atm)

$p_2$  : 下流側の $T_2$ の分圧 (atm)

である。PCA、HT-9中の $T_2$ の透過率 $P_m$ はそれぞれ下の式で与えられる (Szeら、1985)。PCAに対して、

$$P_m = \frac{2.33 \times 10^{-2}}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left(-\frac{15700}{RT}\right) \quad [\text{cm}^3(\text{STP})/(\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{atm}^{\frac{1}{2}})] \quad (3-2)$$

また、HT-9に対して、

$$P_m = \frac{4.66 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} \cdot \exp\left(-\frac{11100}{RT}\right) \quad [\text{cm}^3(\text{STP})/(\text{cm} \cdot \text{sec} \cdot \text{atm}^{\frac{1}{2}})] \quad (3-3)$$

である。ただし、 $R$ は気体定数 (1.99 cal·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)、 $T$ は絶対温度 (K) である。計算結果を表3-13に示す。ただし、 $p_2$ は $p_1 \gg p_2$ として無視した。一次冷却系側あるいは蒸気発生器側の管の表面に酸化膜を coating することにより、トリチウム透過に対する遮蔽効果が期待できる。表3-13には、この酸化膜による遮蔽効果をPCAに対して10、HT-9に対して100 (Szeら)と仮定した場合の1日当たりの透過量が示されている。

表3-13のように、STARFIRE設計ではトリチウムの透過量は、 $4.9 \times 10^{-4}$  g/dあるいは4.9 Ci/dとなる。これは主にブランケット中の $T_2$ の分圧を $1.3 \times 10^{-12}$  atmと非常に低く設定していることによるもので、増殖されたトリチウムは $T_2O$ の形で (分圧 $1.3 \times 10^{-3}$  atm) 回収される。しかし、最近のリチウム化合物への中性子照射実験では、 $LiAlO_2$  から回収されたトリチウムの数パーセントはHTの形であったという報告もある (Billone and Liu、1985およびSzeら)。また、水素は酸化物の形 (HTOあるいは $T_2O$ ) では材料透過の問題は生じないと考えられているが、酸化膜を coating したステンレス鋼管をHTOが透過したという実験結果もある (Longhurstら、1983)。

表3-13のように、WITAMIR-IとHIBALLではトリチウムの透過量は非常に大きくなるが、蒸気発生器の管を二重壁にし、その壁と壁の間に $O_2$ を含むガスを流して $T_2$ をHTOの形にして回収し、これによって透過量を減少させることを提案している。この二重壁の管の採用により、蒸気発生器側への漏洩は0.01~0.02 Ci/dと評価されている。しかし、Szeらの計算によればこの方法によっては85~98%のトリチウムが回収されるにすぎないという。例えば、透過するトリチウムの98%が回収されるとすると、表3-

13の透過量はWITAMIR-Iで18Ci/d、HIBALLで66Ci/dとなる。

表3-13. トリチウム透過量計算のためのパラメータ

	STARFIRE	WITAMIR-I	HIBALL
トリチウム増殖材	LiAlO <sub>2</sub>	Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub>	Li <sub>17</sub> Pb <sub>83</sub>
上流側	ブランケット	Li-Pb冷却材	Li-Pb冷却材
下流側	一次冷却系	蒸気発生器	蒸気発生器
材料	PCA	HT-9	HT-9
面積 (cm <sup>2</sup> )	5.76×10 <sup>7</sup>	1.6×10 <sup>8</sup>	5.2×10 <sup>8</sup>
厚さ (cm)	0.15	0.1	0.1
上流側の圧力 (atm)	1.3×10 <sup>-12</sup>	1.3×10 <sup>-7</sup>	1.3×10 <sup>-7</sup>
温度 (K)	773	673	588-763
酸化膜の遮蔽効率	10	100	100
透過量 (g/d)	4.9×10 <sup>-4</sup>	8.9×10 <sup>-2</sup>	3.3×10 <sup>-1</sup>

## (2) 周辺公衆に対するトリチウム被曝

トリチウムは壊変により最大18keV、平均エネルギー5.7keVのβ線を放出する。このβ粒子のエネルギーは低く、水中あるいは生物組織中での飛程は0.005mmであるが、放射線により影響を受けやすい層は皮下0.04mm以上の深さにある (Rohwer and Wilcox, 1976) ので、トリチウムの場合、外部被曝は問題とならず、食物摂取、呼吸などを通してトリチウムを体内に取り込むことによる内部被曝が重大となる。したがって、以下では内部被曝のみを評価する。

原子力発電所や燃料再処理施設などで発生するトリチウムは気体または液体廃棄物として環境中へ放出されるが、その大部分はHTまたはHTOの形である。HTOはHTよりも毒性が強いため、ここでは安全側に立ってトリチウムはすべてHTOの形で大気中に放出されるとして、全身被曝線量を評価する。被曝線量計算は、平常運転時に定常的に放出される場合と、事故時に比較的短時間に大量に放出される場合とについて行う。また、以下の評価では、建屋等による遮蔽や換気系によるトリチウムの回収などの効果は無視されている。

トリチウムを生体内へ取り込む経路として呼吸 (皮膚からの吸収を含む) だけを考えるならば、被曝線量は次式で計算される。

$$\text{Dose} = A_T \times \left(\frac{C}{Q}\right) \times \text{BR} \times \text{DCF} \quad (3-4)$$

ただし、Dose : 被曝線量 (rem)

A<sub>T</sub> : トリチウム放出量 (Ci)

C : 着目地点におけるトリチウム濃度 (Ci/m<sup>3</sup>)

Q : 放出率 (Ci/sec)

BR :呼吸率 (m<sup>3</sup>/sec)

DCF :線量換算率 (rem/Ci)

である。いくつかのBRとDCFの値を表3-14に示す。STARFIREでは24時間の平均呼吸率を $1.64 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/secとし、この値の63%を皮膚からの吸収として加えている。Holdren (1981) やGurol and Dabiri (1984) のBRの値はいずれも活動時の呼吸率で、皮膚からの吸収を呼吸の50%として加えており、これらの値は事故時にトリチウムを放出した場合の計算に使用されている。STARFIREにおいても、事故時の評価では呼吸を $3.33 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/secあるいは $5.0 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/secとし、皮膚からの吸収をその50%として計算している。表3-14中の線量換算率DCFの値は出典ごとでばらつきがあるが、値の根拠は示されていない。Tillら (1981) によると、U. S. NRCは食物摂取に対して62 rem/Ci、また、呼吸に対して94 rem/Ciとしている。

表3-14. BRとDCFの値

BR (m <sup>3</sup> /sec)	DCF (rem/Ci)	出典
$2.67 \times 10^{-4}$	96	STARFIRE(1980)
$2.66 \times 10^{-4}$	62.7	Edlund(1983)
$7.5 \times 10^{-4}$	70	Holdren(1981)
$6.24 \times 10^{-4}$	107.7	Gurol and Dabiri(1984)

平常運転時のトリチウム被曝線量計算では、大気中のトリチウム濃度は平衡状態にあると仮定し、(3-4) 式中のC/Q (sec/m<sup>3</sup>) の値は次のブルーム拡散式で与えられる。

$$\frac{C(x, y, z)}{Q} = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (3-5)$$

ただし、u :風速 (m/sec)

H<sub>e</sub> :放出源の有効高さ (m)

σ<sub>y</sub> :濃度分布のy方向(水平方向)の拡散パラメータ (m)

σ<sub>z</sub> :濃度分布のz方向(鉛直方向)の拡散パラメータ (m)

である。距離x、y、zの単位はmで、x-y平面を地表面に、また、z軸を鉛直上向きにとり、放出源はz軸上にあるものとする。x軸は風速の向きに一致させる。拡散パラメータσ<sub>y</sub>、σ<sub>z</sub>はxの関数で、Pasquill-Gifford図に従うものとし、近似的に次の式で表わされる。

$$\sigma_y = \gamma_y \cdot x^{\alpha_y} \quad (3-6)$$

$$\sigma_z = \gamma_z \cdot x^{\alpha_z} \quad (3-7)$$

係数 $\alpha_y$ 、 $\gamma_y$ 、 $\alpha_z$ 、 $\gamma_z$ は、Pasquillの大気安定度A~Fによって定まるが、値は東京都環境保全局(1982)から引用した。

$u=1\text{ m/sec}$ 、 $H_e=10\text{ m}$ および $u=1\text{ m/sec}$ 、 $H_e=100\text{ m}$ としたときの $x$ 軸上( $y=z=0\text{ m}$ )の $C/Q$ の分布をそれぞれ図3-1-1および図3-1-2に示す。図3-1-1、3-1-2中の破線は、それぞれの曲線群の包絡線を表わすが、これは距離に伴う拡散の傾向を見るのによい。放出源から敷地境界までの水平距離を1000mとすると、図3-1-1、3-1-2の $x=1000\text{ m}$ における包絡線上の値から、

$$H_e=10\text{ mのとき、} \quad \log(C/Q)=-3.3 \quad \text{あるいは} \quad C/Q=5.0 \times 10^{-4} \text{ sec/m}^3$$

$$H_e=100\text{ mのとき、} \quad \log(C/Q)=-4.8 \quad \text{あるいは} \quad C/Q=1.6 \times 10^{-5} \text{ sec/m}^3$$

である。表3-12に示されているように、平常運転時に核融合炉プラントから放出されるトリチウムの量は、D-T炉の場合1日あたり約10Ci、あるいは、年間およそ5000Ciと評価されている。したがって、 $A_T=5000\text{ Ci/yr}$ として(3-4)式からトリチウムによる被曝線量を計算すると、 $H_e=10\text{ m}$ のとき、

$$\text{Dose} = 5000 \times 5.0 \times 10^{-4} \times 2.67 \times 10^{-4} \times 96 = 64 \text{ mrem/yr}$$

である。また、 $H_e=100\text{ m}$ のとき、

$$\text{Dose} = 5000 \times 1.6 \times 10^{-5} \times 2.67 \times 10^{-4} \times 96 = 2.1 \text{ mrem/yr}$$

となる。ただし、BRとDCRの値は表3-14のSTARFIREのものを用いた。現在の原子力発電所の安全審査指針では、平常運転時の周辺公衆に対する被曝線量(線量目標値)を年間5mremとしている(原子力委員会、1975)。したがって、上で求めた $H_e=100\text{ m}$ のときの被曝線量2.1mrem/yrは線量目標値を下回る。図3-1-1、3-1-2の $C/Q$ 値を被曝線量に換算し、かつ、一つの図に合成したものを図3-2に示す。図3-2から、煙突高100mの効果が読み取れる。以上の計算では、年間を通じて風が常に一定の方向に1m/secで吹く場合を仮定している。現実的には、風向や風速が変化するため、被曝線量は図3-2中の値よりも小さくなる。また、D-D炉では、表3-12のように、放出率は0.3Ci/dまたは110Ci/yrとしているから、 $A_T=110\text{ Ci/yr}$ として、 $H_e=10\text{ m}$ のとき1.4mrem/yr、また、 $H_e=100\text{ m}$ のとき0.045mrem/yrとなり、煙突がなくても線量目標値を下回る。

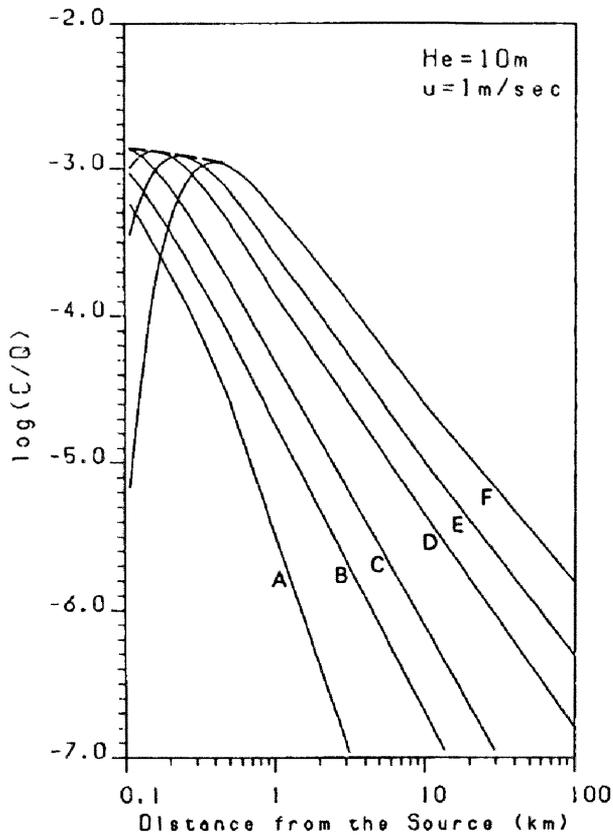


図3-1-1.  $u=1\text{m/sec}$ 、 $H_e=10\text{m}$ の場合

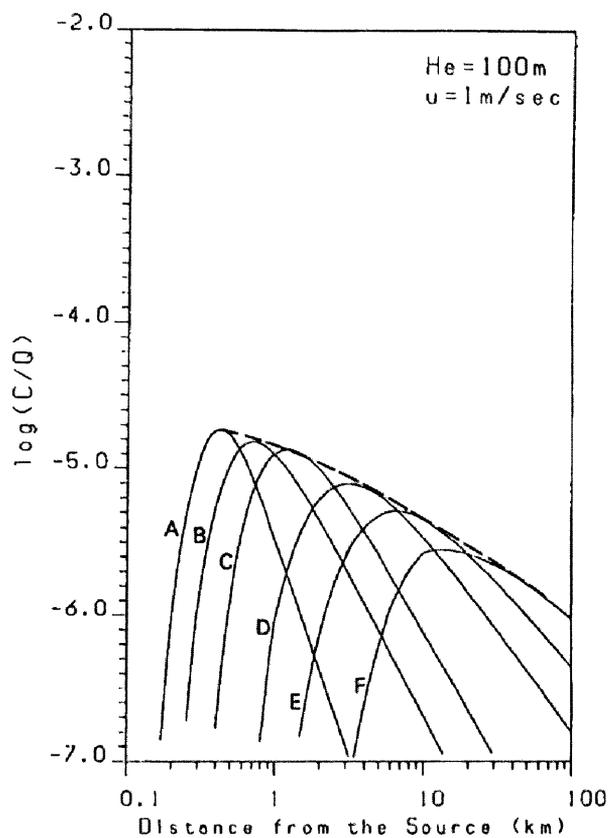


図3-1-2.  $u=1\text{m/sec}$ 、 $H_e=100\text{m}$ の場合

図3-1. x軸上におけるC/Qの値

破線は、Pasquill 大気安定度A～Fに対する曲線群の包絡線を表わす。

次に、トリチウムの取り込み経路として呼吸と食物摂取の両方を考える。Tillらは、環境中に放出されたトリチウムによる被曝線量の評価方法として四つの方法を検討しているが、その内、National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP)の方法が計算方法の簡便さという点で最も優れ、また、計算結果も他の三つの方法によるものとよく一致すると結論付けている。NCRPの方法は次の式で計算される。

$$D = (1.22C_w + 1.27C_{f_1} + 0.29C_{f_2} + 0.22C_a) \times \frac{1}{3.0} \times \text{DRF} \quad (3-8)$$

- ただし、
- D : 年間被曝線量 (mrem/yr)
  - $C_w$  : 飲料水中のトリチウム濃度 (pCi/l)
  - $C_{f_1}$  : 食物中の水分中のトリチウム濃度 (pCi/l)
  - $C_{f_2}$  : 食物の酸化によって生じる水分中のトリチウム濃度 (pCi/l)
  - $C_a$  : 大気中の水分中のトリチウム濃度 (pCi/l)
  - DRF : 線量換算率 [ (mrem/yr) / (pCi/l) ]

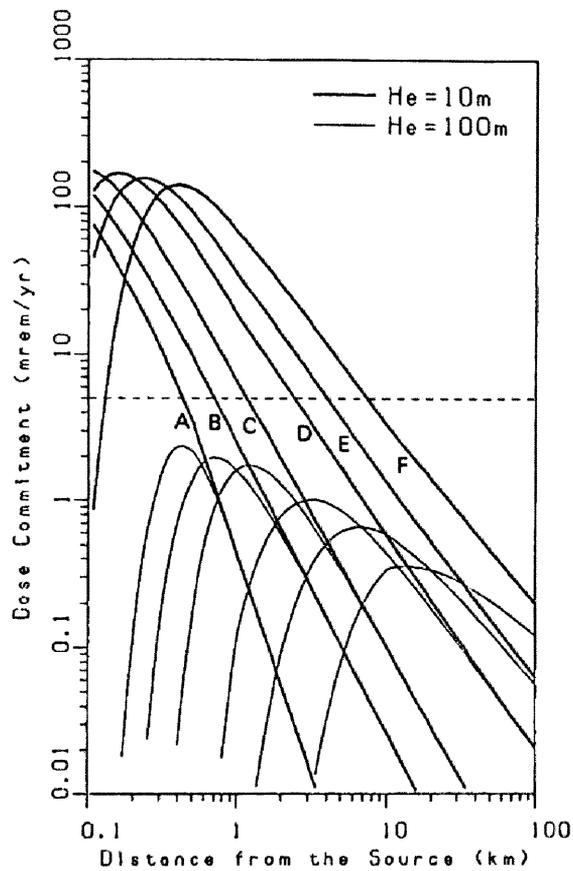


図3-2. トリチウムの年間被曝線量

Pasquill 大気安定度 A~F に対して、 $A_T=5000\text{Ci/yr}$ 、 $BR=2.67\times 10^{-4}\text{m}^3/\text{sec}$ 、 $DCF=96\text{rem/Ci}$  の場合。破線は線量目標値の  $5\text{mrem/yr}$  を表わす。

である。(3-8) 式の括弧中の各項の係数は、標準的な人が 1 日あたり 3.0 l の水分を摂取するとしたときの内訳を表わす。第 4 項の係数 0.22 は呼吸 (皮膚からの吸収を含む) の寄与分を表わしている。NCRP は DRF の値として  $95\times 10^{-6}(\text{mrem/yr})/(\text{pCi/l})$  を使用している。大気中のトリチウム濃度  $1\text{pCi/m}^3$  を大気中の水分中のトリチウム濃度に換算すると、

$$\frac{1(\text{pCi/m}^3)}{6(\text{g-H}_2\text{O/m}^3)} = 1.7\times 10^{-1}(\text{pCi/g-H}_2\text{O}) = 1.7\times 10^2(\text{pCi/l-H}_2\text{O})$$

となる。ただし、大気中の  $\text{H}_2\text{O}$  の密度を  $6\text{g/m}^3$  (NCRP の値) とする。これより、大気中のトリチウム濃度  $1\text{pCi/m}^3$  に対して  $C_a = 170\text{pCi/l}$  となる。

先程のブルーム拡散式において、 $x=1000\text{m}$ 、 $y=z=0\text{m}$ 、 $u=1\text{m/sec}$ 、 $H_0=100\text{m}$  のとき、 $C/Q=1.6\times 10^{-5}\text{sec/m}^3$  であった。トリチウムの年間放出量が  $5000\text{Ci/yr}$  ならば、トリチウム濃度  $C$  は、

$$\begin{aligned} C &= 1.6\times 10^{-5}(\text{sec/m}^3) \times 5000(\text{Ci/yr}) \times \frac{1}{365\times 24\times 3600}(\text{yr/sec}) \\ &= 2.5\times 10^3(\text{pCi/m}^3) \end{aligned}$$

となる。したがって、このCの値に対する $C_a$ は、

$$C_a = 2.5 \times 10^3 \times 170 = 4.3 \times 10^5 \text{ pCi/l}$$

となる。(3-8)式の中で呼吸に関する部分の被曝線量を計算すると、

$$0.22 \times 4.3 \times 10^5 \times \frac{1}{3.0} \times 9.5 \times 10^{-5} = 3.0 \text{ mrem/yr}$$

を得る。この値は(3-4)式を使って計算した値 $2.1 \text{ mrem/yr}$ よりも50%大きくなるが、線量目標値の $5 \text{ mrem/yr}$ よりは小さい。

$C_w$ 、 $C_{f_1}$ 、 $C_{f_2}$ のデータがないので、(3-8)式を使って計算を進めて行くことができないが、(3-8)式の中で、食物を介しての水分摂取の割合はかなり大きいので、食物摂取による被曝線量の評価は重要と考えられる。例えば、飲料水中のトリチウム濃度を大気中の水分中のトリチウム濃度の1% ( $C_w = 0.01 C_a$ )、食物中の水分中のトリチウム濃度をその50% ( $C_{f_1} = C_{f_2} = 0.5 C_a$ )とするならば(Ti11ら)、 $C/Q = 1.6 \times 10^{-5} \text{ sec/m}^3$ のとき、食物摂取による被曝線量は $11 \text{ mrem/yr}$ となる。ただし、これは非常に悲観的な場合である。また、トリチウム放出量が $110 \text{ Ci/yr}$ の場合には、 $H_e = 10 \text{ m}$ のときの値 $C/Q = 5.0 \times 10^{-4} \text{ sec/m}^3$ を使って、呼吸に関する部分が $2.0 \text{ mrem/yr}$ 、食物摂取に関する部分が $7.3 \text{ mrem/yr}$ となる。

事故時の場合には、トリチウムの放出は比較的短時間であると考えられるので、食物摂取による影響は考慮せず、呼吸(皮膚からの吸収を含む)による取り込みだけを考える。大気拡散式は、トリチウムが一定時間、連続的に放出されると仮定するならばブルーム・モデルを、瞬間放出を仮定するならばパフ・モデルを使用する。ただし、ブルーム・モデルは気象条件として有風時(風速 $1 \text{ m/sec}$ 以上)の場合に、パフ・モデルは無風時または弱風時(風速 $1 \text{ m/sec}$ 未満)の場合にそれぞれ有効である。ブルーム・モデルを使うならば、 $C/Q$ 値は(3-5)式から計算し、被曝線量は(3-4)式から求める。パフ・モデルは次の式で与えられる。

$$\frac{C(x, y, z, t)}{Q} = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right\} \cdot \left[\exp\left\{-\frac{(z-H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\} - \exp\left\{-\frac{(z+H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right\}\right] \quad (3-9)$$

ただし、 $t$  : 経過時間 (sec)

$\sigma_x$  : 濃度分布のx方向の拡散パラメータ (m)

である。(3-9)式中の $Q$ は放出率(Ci/sec)ではなく、放出量(Ci)を表わす。したがって、 $C/Q$ の単位は $(\text{m}^3)^{-1}$ である。(3-9)式中の拡散パラメータ $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ は時間 $t$ の関数で、次式で与えられる。

$$\sigma_x = \sigma_y = \alpha' \cdot t \quad (3-10)$$

$$\sigma_z = \gamma' \cdot t \quad (3-11)$$

ただし、定数 $\alpha'$ 、 $\gamma'$ はPasquillの大気安定度A～Fによって定まる。 $\alpha'$ 、 $\gamma'$ のデータは東京都環境保全局から採った。パフ・モデルでは、Cは時刻tにおける濃度を表わすから、被曝線量は次式で計算される。

$$\text{Dose} = \int_0^T C \cdot BR \, dt \times \text{DCF} \quad (3-12)$$

ただし、Tは、放射性雲が着目地点を通過して、濃度が十分に小さくなるまでの時間である。(3-12)式を(3-4)式に対応させて書き直せば、

$$\text{Dose} = A_T \times \int_0^T \left(\frac{C}{Q}\right) dt \times BR \times \text{DCF} \quad (3-13)$$

となる。ただし、Qの単位はCiである。

表3-12に示されているように、核融合炉プラント中に存在するトリチウムの量は概念設計によって様々であるが、ここでは、安全側の評価のために、出力1000MW<sub>e</sub>のD-T核融合炉1基あたり10kgあるいは100MCiのトリチウムが常時プラント内に存在するものとする。ここで、トリチウム放出量に基づいて、三つのレベルの事故を想定することにする。すなわち、

レベルA	プラント全体が破壊した場合	トリチウム	100MCi (10kg) 放出
レベルB	貯蔵系が破壊した場合	トリチウム	10MCi (1kg) 放出
レベルC	一部が破壊した場合	トリチウム	1MCi (100g) 放出

とする。さらに、レベルBおよびレベルCの事故は、原子炉立地審査指針(原子力委員会、1964)における、仮想事故および重大事故にそれぞれ相当すると仮定する。

事故時のトリチウムによる被曝線量の計算では、呼吸率は活動時のものを使用することにする。ここでは、STARFIREの値を採用して、呼吸率を $3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ とし、これに皮膚からの吸収として50%を加えて、 $BR = 5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ とする。レベルCの事故を考え、 $A_T = 1 \text{ MCi}$ (トリチウム100g)、 $\text{DCF} = 96 \text{ rem/Ci}$ 、 $u = 1 \text{ m/sec}$ として、放出地点からの距離と被曝線量との関係をプルーム・モデルおよびパフ・モデルにより求めたものを、それぞれ図3-3-1および3-3-2に示す。図3-3-1、3-3-2には $H_e = 10 \text{ m}$ のときと $H_e = 100 \text{ m}$ のときものが合成して示されている。図中の破線は、原子炉立地審査指針の中の、「非居住区域」および「低人口地帯」の範囲を判断するための目安となっている25remを表わしている。レベルAおよびレベルBの事故の場合の被曝線量は、図3-3-1、3-3-2中の値をそれぞれ100倍および10倍すれば求めることができる。

図3-3-1、3-3-2から、プルーム・モデルの方がパフ・モデルよりも結果が厳しく出る。煙突高100mの効果はここでも示されているが、事故時の評価では $H_e = 10 \text{ m}$ の場合の結果も重要であろう。目安値の25remと図3-3-1の結果とを比較すると、最悪の場合、

レベルCの事故 (100 g 放出) 1 km地点で25 rem、10 km地点で1.2 rem

レベルBの事故 (1 kg 放出) 6 km地点で25 rem、10 km地点で12 rem

レベルAの事故 (10 kg 放出)  $H_0 = 100\text{m}$ としても10 km地点で23 rem

となる。よって、放出源から少なくとも1 km以内は非居住区域でなくてはならない。したがって、核融合炉プラントを敷地の中心に置くとすれば、敷地面積は2 km×2 kmあるいはそれ以上にする必要がある。また、中心から少なくとも半径6 km以内は、低人口地帯である必要がある。

D-D炉に関しては、表3-12から、出力1000MW<sub>e</sub>の核融合炉1基あたり50 gあるいは0.5 MCiのトリチウムが存在すると仮定して、この全量が事故時に放出されたとすると、

50 g 放出 500 m地点で25 rem、1 km地点で13 rem、10 km地点で0.63 rem

となる。したがって、トリチウムの安全性からは非居住区域と低人口地帯は共に中心から半径500 m以内となり、必要な敷地面積は1 km×1 kmとなる。

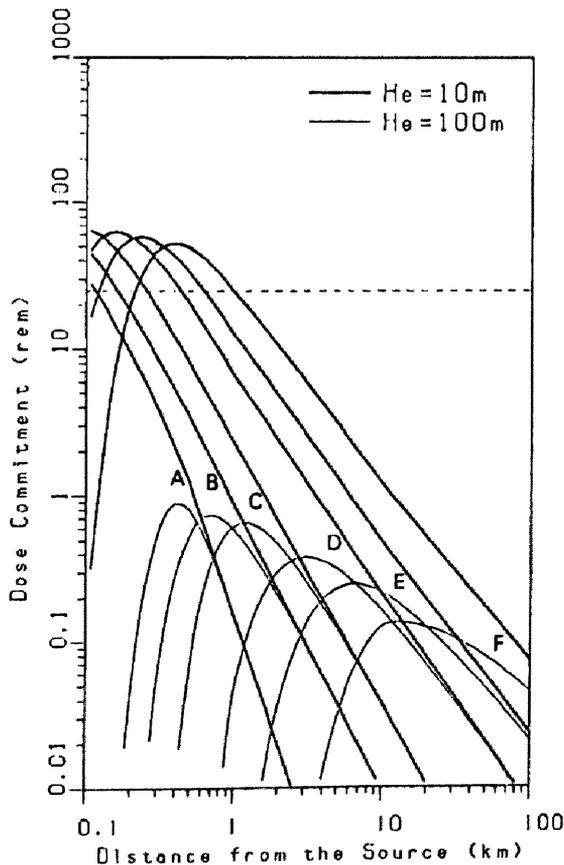


図3-3-1. プルーム・モデルの場合

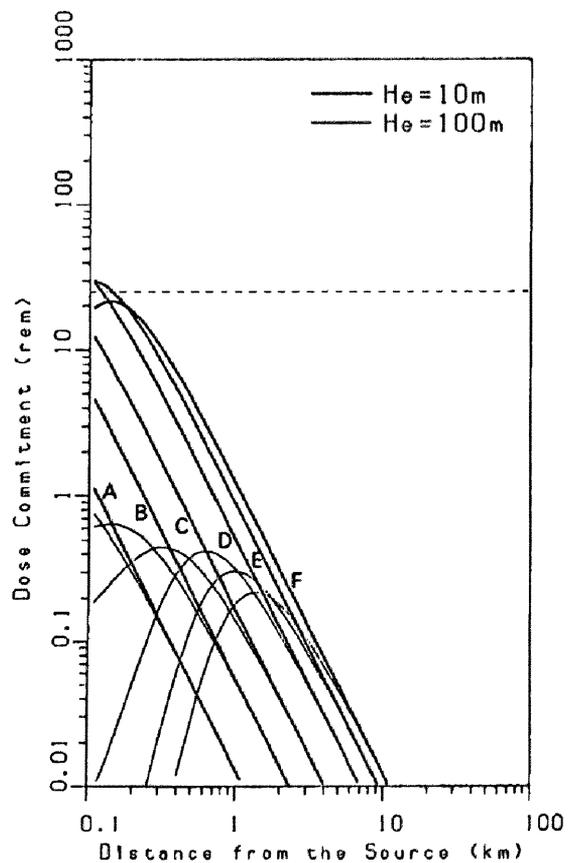


図3-3-2. パフ・モデルの場合

図3-3. レベルCの事故( $A_T=1\text{MCi}$ )に対するx軸上でのトリチウム被曝線量

A~FはPasquill安定度階級を表わす。破線は「非居住区域」および「低人口地帯」の範囲の目安となる25 remを表わす。

わが国では、ICRP (国際放射線防護委員会) の新勧告を受けて、現行の放射線防護法令の改正作業が行わ

れているが、上の議論と関連すると思われるのは、「公衆の線量限度を現行の年間0.5 remから、原則として年間0.1 rem、条件付きで年間0.5 remとする。」(原子力安全委員会、1987)の部分である。したがって、本論文では、平常運転時の公衆に対する被曝線量の評価基準として、線量目標値の年間5 mremを採用しているの、上の議論には影響を及ぼさない。

### (3) 事故時の誘導放射能の放出

表3-4、3-12に示されているように、核融合炉プラント内に存在する放射化材料の誘導放射能は運転停止時には数千MCiに達し、トリチウムの放射能よりも一桁大きい。したがって、事故が発生した場合には、トリチウムよりも誘導放射能の方が大きな被害をもたらす可能性もある。Pietら(1983)によれば、酸素が存在すると、モリブデンは700℃以上で揮発性のMoO<sub>3</sub>となって蒸発する。316SS(Mo成分比2.0~2.5%)では1000℃以上で、また、HT-9(Mo1.0%)では1300℃以上でMoO<sub>3</sub>の形成および蒸発が始まる。Mayaら(1985)やHensleeら(1985)は、温度、時間などの条件を変えてPCAやHT-9から蒸発する元素の割合を実験的に求めている。したがって、冷却材喪失事故が起こり、かつ、プラズマ停止が行われなくて高温が維持され、同時に、酸素が供給されて放射化材料と反応するという事態を想定するならば(Gurol and Dabiri)、誘導放射能が環境へ放出されることがあるかも知れない。

そこで、放射化したモリブデンが大気中に放出された場合の、γ線による外部被曝線量を求めてみる。外部被曝線量は次式で計算される。

$$Dose = A_{RI} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot E \cdot \mu_a \cdot \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} \cdot B(\mu r) \cdot \frac{C(x, y, z)}{Q} dx dy dz \quad (3-14)$$

ただし、Dose : 被曝線量 (rem)

A<sub>RI</sub> : 誘導放射能放出量 (Ci)

K<sub>1</sub> : 照射線量率への換算係数 [=1.88×10<sup>3</sup>/3600 dis·m<sup>3</sup>·R/(MeV·Ci·sec)]

K<sub>2</sub> : 照射線量から線量当量への換算係数 (=0.7 rem/R)

E : γ線実効エネルギー (MeV/dis)

μ<sub>a</sub> : 空気に対するγ線の真吸収係数 (m<sup>-1</sup>)

μ : 空気に対するγ線の全吸収係数 (m<sup>-1</sup>)

r : 被曝地点とブルーム内微小体積との距離 (m)

B(μr) : 空気に対するγ線の再生係数

である。C/Qの単位はsec/m<sup>3</sup>で、(3-5)式のブルーム拡散式から計算する。再生係数は次式で与えられる。

$$B(\mu r) = 1 + \alpha(\mu r) + \beta(\mu r)^2 + \gamma(\mu r)^3 \quad (3-15)$$

(3-14) 式および (3-15) 式中の係数  $\mu_a$ 、 $\mu$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は実効エネルギー  $E$  によって定まるが、そのデータは茅野ら (1984) から採った。

モリブデンの放射性同位体のうち、 $\gamma$  線を放出するのは  $^{99}\text{Mo}$  (半減期 66.2 時間、 $\gamma$  線実効エネルギー 0.15 MeV/di s) だけである (Cheng, 1983)。 $A_{RI} = 1 \text{ M Ci}$  の場合の、風下方向の  $^{99}\text{Mo}$  による被曝線量を図 3-4 に示す。図 3-4 の結果は図 3-3-1 と対比されるものである。トリチウムによる内部被曝に比べて  $\gamma$  線による外部被曝はその影響の及ぶ範囲が非常に広く、特に、 $H_e = 100 \text{ m}$  においてその差が著しい。図 3-4 から、最悪の場合、放出源から 1 km 地点で 15 rem、10 km 地点で 8.3 rem となる。一つ注意を要するのは、D-D 炉の場合、D-T 炉に比べてトリチウムのリスクは軽減されるため、誘導放射能の放出が相対的に重大となる可能性があると思われる。

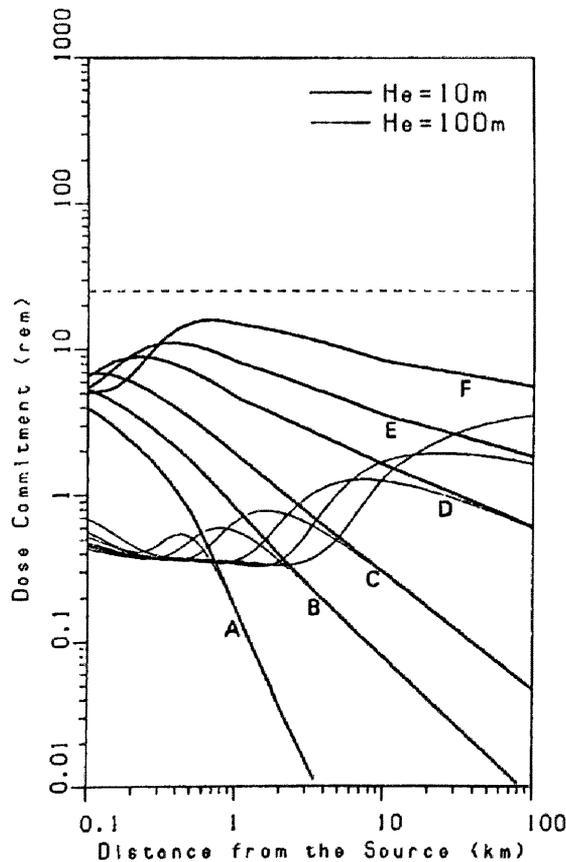


図 3-4. x 軸上での  $^{99}\text{Mo}$  による外部被曝線量

$A_{RI} = 1 \text{ M Ci}$ 、 $u = 1 \text{ m/sec}$  の場合。A~F は Pasquill 安定度階級を表わす。破線は「非居住区域」および「低人口地帯」の範囲の目安となる 25 rem を表わす。

(付記)

1986年4月26日、ソ連ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所4号機が、原子炉建屋をも破壊する大事故を起こした。放出された放射能は国境を越えて飛散し、約9000km離れた日本でも、事故に由来すると思われる放射性物質が検出された(外川ら、1988)。ソ連の報告書では、放射性物質の放出がほぼ終了した5月6日の時点で減衰補正した値で、希ガス約50MCiとそれ以外の放射性物質約50MCi、総計100MCi(誤差±50%)が環境に放出されたと報告されているが(Powersら、1987)、これは、事故時のトリチウムによる被曝線量計算で仮定した、1000MW<sub>e</sub>級核融合炉内に存在するトリチウムの量と同程度である(ただし、瀬尾ら(1988)によると、放出時に逆補正して実量になおすと、放出された放射性物質の総量は、300MCiを超えるという。)

チェルノブイリ事故では、初期爆発以後、10日間の長期にわたって、1日に2~12MCi(5月6日換算、希ガスを除く)の放射能が環境に放出され続けた。大量の放射能放出が長期に及んだ物理的および化学的プロセスは、必ずしもよく理解されていないが、Powersらは、減速材として使用された1700tのグラファイトの存在が大きく関与している可能性があると指摘している。STARFIREでは、プラント中に存在するトリチウム量は11.7kg(117MCi)であるが、1回の事故で放出されるトリチウムは10g(0.1MCi)程度と評価している。しかし、STARFIREには、反射材として164tのグラファイトが使用されており、火災が発生した場合には、被害が大きくなる可能性もあり得る。

### 3-4. 核融合・核分裂ハイブリッド炉の安全性

安全性からみるとハイブリッド炉は核融合と核分裂の両方の特徴を持つため、ハイブリッド炉の安全性に関しては、表3-2に掲げた核融合と核分裂の項目を同時に考慮する必要がある。トリチウムの問題については、前の項での議論がD-Tハイブリッド炉にも適用できる。Kastenbergrら(1979)のミラー型ハイブリッド炉の概念設計に基づく研究によると、ハイブリッド炉中の核燃料のエネルギー密度はLWRのものと同程度であるため、崩壊熱の除去が必要で、冷却材喪失事故が発生すれば燃料の溶解が起こる。

Schultzら(1980)は、熱出力4000MW<sub>e</sub>のタンデム・ミラー型ハイブリッド炉の概念設計をもとにしてリスク・アセスメントを行っている。Schultzらは、燃料生産に関して四つのタイプのブランケットを考えている。すなわち、ウランを親物質とし、ブランケット中での核分裂反応を積極的に行う場合(uranium fast-fission:U-f fブランケット)、トリウムを親物質とし、ブランケット中での核分裂反応を積極的に行う場合(thorium fast-fission:Th-f fブランケット)、トリウムを親物質とし、ブランケット中での核分裂反応を抑制する場合(thorium fission-suppressed:Th-f sブラ

ンケット)、燃料生産をしない純粋な核融合炉ブランケットの場合 (pure fusion : PFブランケット) の四つである。この四つのタイプのブランケットに対するパラメータを表3-15に示す。また、表3-15には、ハイブリッド炉中に存在するトリウム、放射化材料、核分裂生成物、アクチノイドのそれぞれの放射能の量も示されている。ハイブリッド炉では、核分裂生成物とアクチノイドが全体の放射能の大部分を占める。ハイブリッド炉中の核分裂生成物の放射能レベルは、同程度の熱出力を持つLWRの場合とおよそ同じであるが、アクチノイドに関しては、LWR中のアクチノイドの放射能レベルよりも一桁大きい。

運転停止後の放射能の量を表3-16に示す。表3-16には、比較のために1000MW。LWRの場合も示してある。興味深いのは、Th-f fブランケットとTh-f sブランケットではアクチノイドの放射能が、停止後1年から10年にかけて増加することである。これは、 $^{232}\text{U}$ の崩壊とこれに続く娘核種 ( $^{232}\text{U} \rightarrow ^{228}\text{Th} \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{212}\text{Pb} \rightarrow ^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ ) の生成によるものである。例えば、 $^{232}\text{U}$  (半減期72年) の崩壊と $^{228}\text{Th}$  (半減期1.9年) の生成の様子を示すと図3-5のようになる。図3-5から、初期放射能が親核種1 MCi、娘核種0 MCiで出発した場合、10年後には娘核種の放射能だけが増加して合計では初期放射能のほぼ2倍になる。 $^{232}\text{U}$  から始まる崩壊系列の影響はBHP-air (空気に対するBHP) を計算すると一層明瞭になる。なぜならば、表3-17-1に示すように、BHP-airではアクチノイドが支配的であるからである (一方、BHP-water (水に対するBHP) では、表3-17-2のように核分裂生成物が多くを占める)。加えて、表3-17-1のように、トリウムを使用する二つのブランケットでは、 $^{230}\text{Th}$  から始まる崩壊系列中の核種で、毒性が非常に高い $^{210}\text{Po}$  が生成するために、停止後10年から100年にかけてさらにBHP-airの値が増大する。結論として、稼働期間中の安全性からは、ハイブリッド炉としてTh-f sブランケットの選択が好ましい。しかし、トリウムを使用するブランケットでは、アクチノイドに関して放射性廃棄物管理の問題が生じる可能性がある。

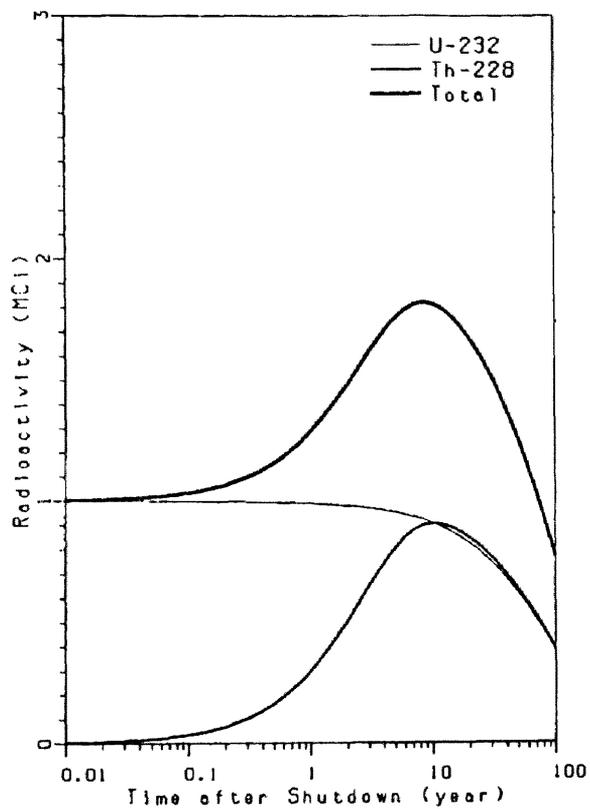


図3-5.  $^{232}\text{U}$  の崩壊と  $^{228}\text{Th}$  の生成

初期放射能は、 $^{232}\text{U}$  が1MCi、 $^{228}\text{Th}$  が0MCi の場合。

表3-15. 四つのブランケットに対するパラメータと放射能インベントリー

	U-ffブランケット	Th-ffブランケット	Th-fsブランケット	PFブランケット
核融合出力(MW <sub>t</sub> )	440	910	2990	3570
ブランケット出力(MWt)	3910	3820	3400	3290
炉長 (m)	18.6	38.8	127	152
ブランケット構造材	Inconel 718	Inconel 718	Inconel 718	Inconel 718
ブランケット寿命(年)	5.5	8.0	8.0	17.5
親物質	U <sub>3</sub> Si	金属トリウム	金属トリウム	-
核燃料生産量(kg/yr)	2230	2650	3680	-
放射能 (MCi)				
トリチウム	12	25	81	97
誘導放射能	350	720	2400	2800
核分裂生成物	1500	1400	280	-
アクチノイド	21000	8700	11000	-
合計	23000	11000	14000	2900

表3-16. 運転停止後のハイブリッド炉中の放射能  
単位はMCi。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
U-ffブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	350	65	5.3	5.6×10 <sup>-6</sup>
核分裂生成物	1500	470	28	2.0
アクチノイド	21000	12	10	5.4
合計	23000	550	43	7.4
Th-ffブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	720	140	12	1.2×10 <sup>-5</sup>
核分裂生成物	1400	410	50	4.2
アクチノイド	8700	130	190	82
合計	11000	680	250	86
Th-fsブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	2400	440	36	3.8×10 <sup>-5</sup>
核分裂生成物	280	75	9.2	0.78
アクチノイド	11000	7.3	8.0	3.7
合計	14000	520	53	4.5
PFブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	2800	530	44	4.6×10 <sup>-5</sup>
1000MW <sub>e</sub> LWR <sup>b</sup>				
核分裂生成物	1300	200	38	4.1
アクチノイド	1100	9.3	5.7	0.49
合計	2400	210	44	4.6

<sup>a</sup>誘導放射能の中で半減期の比較的最長い核種が元のデータに示されていないため、停止後100年における誘導放射能の量は不正確で、実際の値よりも小さいと思われる。

<sup>b</sup>1000MW<sub>e</sub>LWRの初期データは天野(1973)およびBenedictら(1981)から採った。

表3-17. ハイブリッド炉の運転停止後のBHP値

表3-17-1. 空気に対するBHP  
単位は $10^6 \text{km}^3$  (空気)。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
U-f f ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	89	17	2.6	$1.8 \times 10^{-5}$
核分裂生成物	4600	1500	340	34
アクチノイド	120000	110000	110000	85000
合計	120000	110000	110000	85000
Th-f f ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	180	36	5.4	$3.8 \times 10^{-5}$
核分裂生成物	4500	1700	690	71
アクチノイド	100000	140000	280000	4600000
合計	100000	140000	280000	4600000
Th-f s ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	600	120	17	$1.2 \times 10^{-4}$
核分裂生成物	820	310	130	13
アクチノイド	9300	8500	32000	1200000
合計	11000	8900	32000	1200000
PF ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	720	140	21	$1.5 \times 10^{-4}$
1000MW。LWR				
核分裂生成物	2600	680	300	33
アクチノイド	9700	9200	8000	4300
合計	12000	9900	8300	4300

<sup>a</sup>誘導放射能の中で半減期の比較的最長い核種が元のデータに示されていないため、停止後100年における誘導放射能に対するBHP値は不正確で、実際の値よりも小さいと思われる。

表3-17-2. 水に対するBHP  
単位はkm<sup>3</sup> (水)。

	運転停止後の時間			
	0年	1年	10年	100年
U-f f ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	3100	240	30	1.8×10 <sup>-4</sup>
核分裂生成物	660000	73000	33000	3400
アクチノイド	210000	1500	1400	1100
合計	870000	75000	34000	4500
Th-f f ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	6400	500	64	3.8×10 <sup>-4</sup>
核分裂生成物	640000	110000	67000	7200
アクチノイド	96000	14000	22000	9900
合計	740000	120000	89000	17000
Th-f s ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	21000	1600	200	1.2×10 <sup>-3</sup>
核分裂生成物	110000	21000	12000	1300
アクチノイド	110000	770	1000	510
合計	240000	23000	13000	1800
PF ブランケット				
誘導放射能 <sup>a</sup>	25000	2000	240	1.5×10 <sup>-3</sup>
1000MW。LWR				
核分裂生成物	350000	42000	29000	3100
アクチノイド	280	180	150	100
合計	350000	42000	29000	3200

<sup>a</sup>誘導放射能の中で半減期の比較の長い核種が元のデータに示されていないため、停止後100年における誘導放射能に対するBHP値は不正確で、実際の値よりも小さいと思われる。

### 3-5. 知識ベース・システムを用いた異常連鎖の解析

核融合炉プラントのように大規模かつ複雑なシステムにおいて事故が発生した場合に、その異常がどのように連鎖し、また、その影響がどのように波及していくかを予測するのは容易ではない。知識工学的手法はこのような複雑なシステムの構造的安全性を評価する上で有用で、特に、数学的なモデル化が困難である場合に重要である。知識ベース・システムは計算機に格納された知識を使って、解釈、推論、判断を自動的に行うソフトウェア・システムで、ある分野の知識を格納するための知識ベース、一時的に情報を格納するための作業記憶、そして、推論機構の三つから構成される。ある特定の領域の専門的知識をもとにして構築された知識ベース・システムは、エキスパート・システムと呼ばれる。以下で、核融合炉システムの異常時の異常連鎖を解析するために試作した

エキスパート・システムについて述べる。この知識ベース・システムは、Hasegawa (1985) によって開発されたエキスパート・シェルPSL上で実現されている。

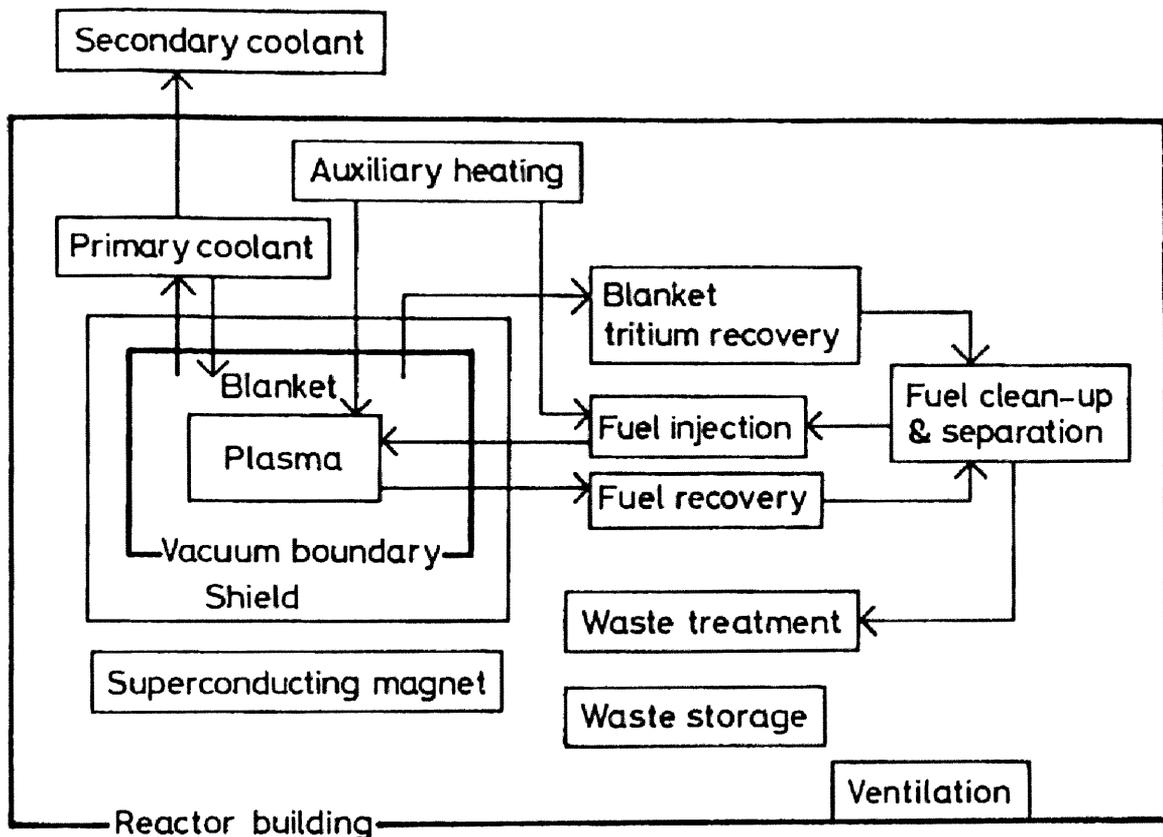


図3-6. 核融合炉システムの構造モデル

異常連鎖シミュレータを構築する上で知識獲得が必要となるが、知識は二種類に分けられる(石田ら、1986)。一つは構造的知識で、これは核融合炉システム内のサブシステム間の構造的な関係や、サブシステムの構造的特性を表わす。簡単な構造モデルを図3-6に示す。図3-6のように、核融合炉システムの構造的関係はネットワークを形成する。異常連鎖の進行に伴ってサブシステム間の構造的関係が変化することもあるため、構造的知識は作業記憶(短期記憶)に格納しておく方が、構造的モデルのデータを動的に変更することができるので都合がよい。また、構造的知識を作業記憶に格納する方法をとれば、シミュレータは異なるネットワーク・モデルに対して適用できる。構造的関係の一例をあげれば、次のようになる。

**(BLANKET LINK-TO PRIMARY-COOLANT)**

これはブランケットが一次冷却系に接続していることを表わしている。構造モデルを記述したデータはまずデータセット中に格納しておく。そして、シミュレーションを開始した直後にそのデータセットから作業記憶に読み込まれる。図3-6から作成した構造モデルのデータをAppendix Cに示す。

もう一つの知識は専門家からの経験的知識で、これが知識ベース(長期記憶)に格納される。ここではD-T炉を想定することにして、経験的知識はプラズマ研究所(1985)による安全解析の研究から採った。この知

識ベースは異常事象が発生した後、最終的にトリチウムあるいは放射性物質（R I）が環境に放出されるまでの過程を追跡するためのものである。プラズマ研究所は、2 2種類の起因事象を抽出し、これらを次の四つのタイプに分類している。

- A. 一つのサブシステムからトリチウムが放出される場合
- B. 一つのサブシステムからR Iが放出される場合
- C. 複数のサブシステムからR Iが放出される場合
- D. energy sourceが介入して、複数のサブシステムからR Iが放出される場合

さらに、プラズマ研究所は、抽出した起因事象の解析をもとにして、異常事象の発生防止および波及緩和のための対策として、次の四つを提案している。

- ①部分格納室（漏洩防止のためのサブシステムのブロック化）
- ②緊急トリチウム処理機能
- ③隔離機能
- ④区画壁、区画配置の最適化

①～③の対策は本知識ベースにおいて表現されているが、④に関しては、二次元的あるいは三次元的構造の記述が必要なため組み込まれてはいない。知識ベースの詳細はAppendix Dに示されている。

知識ベースを構築するために用いたエキスパート・シェルPSLは、プロダクション・システムに属する。プロダクション・システムは、プロダクションと呼ばれる条件付きルールの集合として表現される。プロダクションは"if~then~"の形をもつルールである。PSLで記述されたプロダクションは次のようになる。

(P EXAMPLE	: プロダクション名
(TEMPERATURE INCREASE-AT ?X)	: もし、「サブシステムXで温度が上昇」し、
(?X LINK-TO ?Y)	: 「サブシステムXがサブシステムYに接続する」
---->	: ならば、
(MAKE TRITIUM LEAK-TO ?Y))	: 「トリチウムがサブシステムYに漏洩する」という要素を作業記憶上につくれ。

知識ベース（プロダクション・メモリー）中の要素はすべてこの形で記述される。もし、(TEMPERATURE INCREASE-AT BLANKET)と(BLANKET LINK-TO PRIMARY-COOLANT)という要素がすでに作業記憶上にあって、上のプロダクションが実行されたとすると、(TRITIUM LEAK-TO PRIMARY-COOLANT)という要素が新たに作業記憶に加えられる。作成した異常連鎖シミュレータのソース・プログラムをAppendix Eに示す。Appendix E中のプロダクションR011～R182が核

融合研究の専門家からの知識を表わしている。

また、タイム・ステップの概念は異常連鎖のシミュレーションでは必須であるため、本エキスパート・システムにおいても導入されている。ただし、時刻ではなく、単に事象の発生順序を表わしているに過ぎない。

図3-6の構造モデル (Appendix C参照) を使い、初期事象として、例えば、

(TEMPERATURE INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY)

を入力したとすると、出力は、

```
1 VACUUM-BOUNDARY DAMAGED
  2 VACUUM-BOUNDARY FAILURE
    3 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
      4 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
        5 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
          6 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
            3 RI LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
              4 RI INCREASE-AT PLASMA
```

となる。これは、第2ステップの「真空バウンダリー破損」に続いて、第3ステップでは「RIの建屋への漏洩」と「RIのプラズマへの漏洩」の二つの事象が発生したことを示している。この二つに続く事象は、それぞれ第4ステップ以下に示されている。

図3-6の構造モデルにトリチウム、RI漏洩防止のための機能を付加したシステムの一例を図3-7に示す。

図3-7のモデルを使って、

(TRITIUM INCREASE-AT BLANKET)

と入力すると、

```
1 TRITIUM LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM BLANKET
  2 TRITIUM INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
    3 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDAR
      Y
        4 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
          5 *** EMERGENCY TRITIUM RECOVERY UNIT AT REACTOR
            -BUILDING INVOKED ***
              3 TRITIUM LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
                4 TRITIUM INCREASE-AT PLASMA
                  1 *** ISOLATION VALVE BETWEEN BLANKET AND PRIMARY-COOLANT CL
                    OSED ***
                      1 *** ISOLATION VALVE BETWEEN BLANKET AND BLANKET-TRITIUM-RE
                        COVERY CLOSED ***
```

と出力される。「\*\*\*」で始まるステップで防止機能が作動し、漏洩が阻止されたことが示されている。シミュレータを実行させた例をAppendix Fに示す。

Appendix Fの実行例から、構造モデルを変えることによって、事象の進展がどのように変わるかを見ることができる。このようなアプローチは、核融合炉システムの安全性を確保するために必要な機能を明確にしていく上で、有用であると考えられる。しかし、現在のシミュレータは、知識ベース、構造モデルが共に単純なものであり、また、事象連鎖の追跡も定性的にしか行えないため、質的な向上が必要である。先に触れた、構

造的關係が二次元的、三次元的になる場合の記述も課題である。

知識工学的手法は、確率論的および決定論的な安全解析にも使える。本シミュレータは、核融合開発研究の進展に合わせてレベル・アップされるべきで、最終的には「核融合炉事故診断システム」になるはずである。

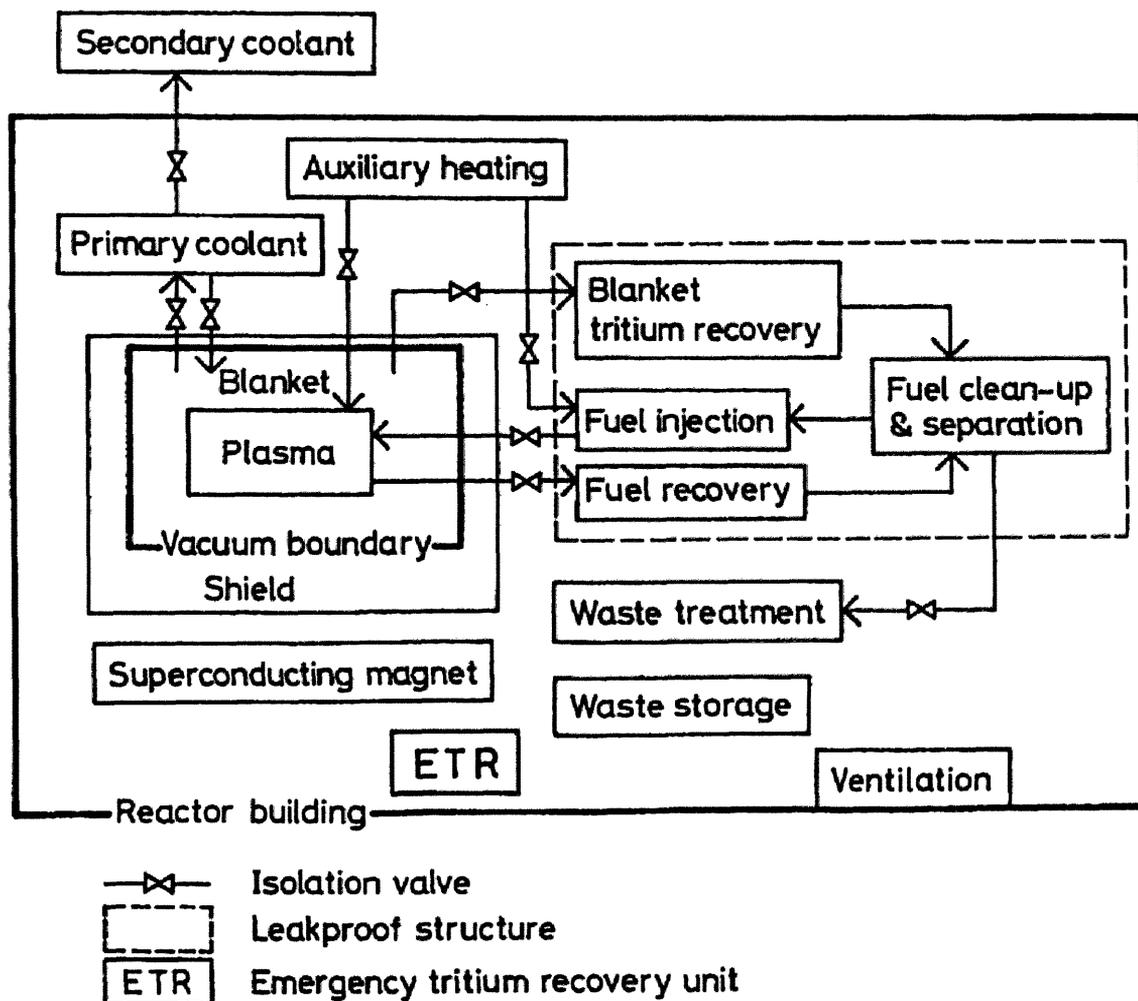


図3-7. トリチウム・RI漏洩防止のための機能を付加した構造モデル

### 3-6. EAとの関連から

核融合炉のアセスメントの第三段階が環境アセスメント (EA) であるが、資源・経済アセスメント (REA) およびリスク・アセスメント (RA) と比較すると、環境アセスメントはより計画熟度の高い、したがって、より具体性の多い計画を対象にすることによって成果が発揮される。核融合炉発電所の立地条件としては、

- (1)敷地面積
- (2)地盤条件・耐震条件
- (3)冷却水の取得・放出

(4)周辺の人口密度

(5)環境問題の解決

(6)地元住民の同意

があろう。これらの項目は、原子力発電所の場合と同様であるが、REA、RAと関連すると思われる(1)、(2)、(3)、(4)、(5)について、原子力発電所との類似と比較から考えてみる(以下の議論は、核融合炉SYSTEM A ASSESSMENT MANUAL(島津、1986)の第三章を参考にしている。)

#### (1)敷地面積

トリチウムの項で見たように、トリチウムの安全性から、純電力1000MW。D-T核融合炉プラント1基当たり2km×2km(400ha)の敷地面積が必要となる。しかし、わが国では立地条件が厳しく制限されるため、400haの規模の敷地を新規に入手することは非常に難しい。一つの打開策として、既設の原子力発電所を核融合炉に置き換えるという代替立地が考えられるが、現在、日本の既存の原子力発電所の中でこの規模の敷地を持つものは一箇所である。もちろん、日本では、冷却水取得の関係から、海岸立地となるため、海上側の敷地境界を考えないとすれば、奥行きは1kmでよいから、必要な面積は2km×1km(200ha)となり、数箇所の原子力発電所はこれを満たすと思われる。ただし、加速器による慣性閉じ込め核融合炉では、ドライバー・システム自身が面積をとるため(HIBLIC-I(Yamakira, 1984)で2.7km×2.7km)、400haを超える敷地面積が必要となる。

#### (2)地盤条件・耐震条件

地盤荷重と炉建屋面積を、核分裂炉と比較したものを表3-18に示す。ただし、核融合炉はSTARFIREの数値を参考にしている。表3-18に示すように、核融合炉の荷重は核分裂炉と同程度であるが、必要面積が大きいため、地盤条件は厳しくなる。敷地面積とも関係するが、原子力発電所では、これまで第三紀およびそれ以前の強固な岩盤が選ばれてきたが、現在、これが得にくくなり、第四紀の地盤を補強して使用するようになってきている。この条件は核融合炉に対しても同じである。

耐震条件については、ほぼ核分裂炉の場合と同じと思われるが、慣性閉じ込め炉では、地震動によるbeam pathのずれが問題になろう。

表3-18. 地盤荷重・炉建屋面積の比較

	核分裂炉	核融合炉
炉面積 (m <sup>2</sup> )	20	500
炉重量 (t)	1000	25000
地盤荷重 (t/m <sup>2</sup> )	50	50
炉建屋面積 (m <sup>2</sup> )	250	6000

### (3)冷却水の取得と放出

発電方式が同じである限り、核分裂発電所と同じ条件が必要となる。現在の原子力発電所では、出力1000MW。当たりの冷却水流量は60 t/secが標準となっている。

### (4)周辺の人口密度

原子炉立地審査指針の基準が適用できると思われる。同指針中の仮想事故の規模が、先のトリチウムの項で想定した、D-T炉の場合のレベルBの事故（トリチウム10MCiまたは1kg放出）と同程度であると仮定するならば、低人口地帯の幅は6km以上にする必要がある。

### (5)環境問題の解決

核分裂炉の場合に比べて特に問題になるのは、やはりトリチウムの放出であろう。mremレベルのトリチウム被曝による、人を含めた生物への影響はまだよくわかっていない。

既存の原子力発電所との代替立地によって、核融合炉発電所の敷地を確保することが不可能あるいは不十分な場合には、核融合炉立地のための新しい方式を探ることが必要となる。新立地方式としては、海洋上、臨海地域における埋め立ておよび人工島、地下などがあるが、これまでに多くの事例があり、また、規模の点においても核融合炉発電所を設置する場合の参考となるとと思われる、臨海埋め立ておよび人工島について、REA、RAの立場から検討してみる。

埋め立て地への施設設置例は多く、例えば、神戸ポートアイランドは436haの面積を持ち、また、515haの製鉄所建設例もある。一般に、面積に技術的な制約はないが、地盤が軟弱なので、荷重条件、耐震条件が問題となるため、地盤改良が必要となる。埋め立て面積が大きい場合には、埋め立て用の砂、砂利等は大量となるため、その採取先に及ぼす影響も考慮する必要がある。

人工島についても、水深がある分だけ埋め立て量が大きくなる点を除けば、臨海埋め立ての場合と同様の問題が生じる。ただし、海岸から人工島までの距離が組み込めるため、非居住区域や低人口地帯の制約は緩和される。

埋め立て地に核融合炉発電所を建設すると仮定して、埋め立てに要するエネルギーを試算すると以下のようなになる。ここでは、埋め立て規模が大きく、また、埋め立て量の詳細なデータが得られる、関西国際空港建設の事例（関西国際空港株式会社、1985）を参考にする。計画は、大阪府泉南の沖合5kmの地点（水深16～19m）に、511haを埋め立てて人工島を造り、この上に空港を建設しようというものである。人工島埋め立てには1haあたり $6.4 \times 10^5$  tの材料（大部分が砂、砂利、石材など）を必要とする。人工島建設に要するエネルギーをまとめると表3-19のようになる（詳細はAppendix BのB-7参照）。資材輸送に陸路あるいは海路のいずれをとる場合にも、全体に占める割合は輸送エネルギーが一番大きい。例えば、核融合炉用地として400haの人工島を建設するとすると、資材輸送に海路をとるとして、その投入エネルギーは、

$$22.3 \times 10^9 \text{ kcal/ha} \times 400 \text{ ha} = 8920 \times 10^9 \text{ kcal}$$

となり、これはSTARFIREへの投入エネルギー $9930 \times 10^9 \text{ kcal}$  (表2-13参照)に匹敵する。もちろん、敷地の中で施設設置のために実際上必要となる面積は、STARFIREの場合、 $640\text{m} \times 680\text{m}$  (44ha)であるから、この部分だけを埋め立てるとすると、

$$22.3 \times 10^9 \text{ kcal/ha} \times 44 \text{ ha} = 981 \times 10^9 \text{ kcal}$$

となり、全体の10%程度となる。また、臨海埋め立ての場合には、水深が浅い分だけ埋め立て量が少なくなるため、投入エネルギーも小さくなる。さらに、同じ敷地内に何基の核融合炉を設置するか、あるいは、同じ敷地を幾世代にわたって使用するかによっても、埋め立てへの投入エネルギーの評価は変わってくる。

用地確保はわが国ではcritical issueであり、現在の段階から検討を始めるべきである。本質的にはトリチウムの安全性向上が必要であり、この点において、わが国におけるD-D (deuterium-deuterium) 炉の開発必要性は高いといえる。

表3-19. 人口島建設に要するエネルギー  
単位は $10^9 \text{ kcal/ha}$ 。

	資材輸送	
	陸路の場合	海路の場合
材料エネルギー	4.3	4.3
作業エネルギー	0.8	0.8
輸送エネルギー	76.8	17.2
合計	81.9	22.3

(付記)

臨界プラズマ条件を達成したJT-60 (日本原子力研究所、1988a)に続いて、自己点火・長時間燃焼の達成を目指す核融合次期装置FER (日本原子力研究所、1988b)の主なパラメータを表3-20に示す。表3-20のように、FER炉ではプラント内に約2kgのトリチウムが存在し、わが国において前例のないD-T反応実験が行われる。したがって、先行装置のJT-60や原子力発電所の安全基準では不相当と考えられ、FER炉以後の核融合施設をも考慮した核融合炉固有の安全基準の策定が望まれる。また、FERの建設地として日本原子力研究所那珂研究所内の $450\text{m} \times 600\text{m}$ が想定されているが(斎藤他、1988)、トリチウムの安全性からは敷地面積として必ずしも十分とはいえないであろう。

表3-20. FERの主なパラメータ

主半径 (m)	4.42
副半径 (m)	1.25
核融合出力 (MW <sub>t</sub> )	409 (ピーク値)
燃焼時間 (sec)	800
トリチウム増殖材	Li <sub>2</sub> O 他
トリチウム循環量 (g/h)	24 (ピーク値)
トリチウム・インベントリー (kg)	~2

## 〔第三章まとめ〕

以上をまとめると次のようになる。

- 1) 核融合炉で年間発生する放射性廃棄物の毒性は、核分裂炉からの使用済み燃料よりも小さいが、放射能レベルは1000MCi/yで、核分裂炉の場合に匹敵する。発生する誘導放射能の量はブランケット構造材の選択に強く依存するため、アルミニウム合金のような低放射化材料の使用が望まれる。
- 2) 核融合炉の廃止措置に伴って発生する炉設備からの放射性廃棄物の量は、D-T炉では重量9300t、体積1400m<sup>3</sup>で、核分裂炉の原子炉圧力容器からの発生量の約20倍となる。ただし、超電導線材を含むシールド外側に位置する材料の多くは再利用可能である。またD-D炉ではD-T炉の場合の約2倍の放射性廃棄物が発生する。
- 3) 周辺公衆に対する安全性からはトリチウムが最も重要であるが、事故時のトリチウム漏洩を想定した場合、D-T炉では非居住区域をプラント敷地内に含めるためには敷地面積を2km×2kmにする必要がある。また、D-D炉では非居住区域と低人口地帯を含めて敷地面積は1km×1km必要となる。
- 4) ハイブリッド炉では、核分裂生成物とアクチノイドによる放射能が支配的で、放射能レベルと毒性は共に核分裂炉と同程度あるいはそれよりも大きい。ブランケットの選択に関して、稼働期間中の安全性からは、トリウムを親物質とし、ブランケット中での核分裂反応を抑制した設計が望ましい。しかし、トリウムを親物質とするブランケットでは運転停止後アクチノイドの空気に対するBHP値が増大し、放射性廃棄物管理の問題が生じる可能性がある。
- 5) 知識ベース・システムを用いて核融合炉システムの事故時の異常連鎖を解析するためのシミュレータを試作した。核融合炉システムの安全性を確保するために必要な安全機能を明確にしていく上で知識工学的アプローチは有効である。
- 6) トリチウムの安全性からD-T炉では敷地面積が大きくなるため、原子力発電所との代替立地を考慮に入れても、核融合炉発電所の用地確保は充分ではない。新しい立地方式の検討が必要である。

- 天野恕 (1973) 核分裂生成物の消滅処理. 化学と工業, Vol. 26, No. 1, 2-7.
- Argonne National Laboratory (1980) STARFIRE - a commercial tokamak fusion power plant study. ANL/FPP-80-1, Vol. 1-2.
- Argonne National Laboratory (1981) WILDCAT : a catalyzed D-D tokamak reactor. ANL/FPP/TM-150.
- BADGER, B. et al. (1979) NUWMAK - A tokamak reactor design study. UWFDM-330, University of Wisconsin, 753 pp.
- BADGER, B. et al. (1980) WITAMIR-I - A University of Wisconsin tandem mirror reactor design. UWFDM-400, University of Wisconsin, 448 pp.
- BADGER, B. et al. (1981) HIBALL - A conceptual heavy ion beam driven fusion reactor study. UWFDM-450 and KfK-3202, University of Wisconsin, 663 pp.
- BARDTENSCHLAGER, R. et al. (1978) Decommissioning of Light-Water Reactor Nuclear Power Plants. Nuclear Engineering and Design, Vol. 45, 1-51.
- BENEDICT, M. et al. (1981) Nuclear chemical engineering. Second edition, McGraw-Hill, (Japanese ed. Nikkan Kogyo Shinbunsha, (1984), 214 pp.).
- BILLONE, M.C. and Y.Y.LIU (1985) Tritium percolation, convection, and permeation in fusion solid-breeder blankets. Fusion Technology, Vol. 8, 881-886.
- CHENG, E.T. (1983) Radioactivation characteristics for deuterium-tritium fusion reactors. Nuclear Technology/Fusion, Vol. 4, 545-560.
- 茅野政道他 (1984) SPEEDI : 緊急時環境線量情報予測システム. 日本原子力研究所, JAERI-M 84-050, 80 pp.
- CONN, R.W. et al. (1977) SOLASE - A conceptual laser fusion reactor design. UWFDM-220, University of Wisconsin.
- EDLUND, O. (1983) Environmental analysis : Radiation doses from tritium releases. Next European Torus Report No.16, 44 pp.
- 原子力委員会 (1964) 原子炉立地審査指針及びその適用に関する判断のめやすについて.

- 原子力委員会（1975）発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に関する指針について。
- 原子力安全委員会（1987）原子力安全白書（昭和61年版）. 389 pp.
- GUROL, H. and A.E.DABIRI (1984) Safety assessment of the MARS tandem mirror reactor. Fusion Technology, Vol. 6, 605-615.
- HASEGAWA, A. (1985) Expert Systems and Earth Sciences - Expert Shell PSL and Its Application. Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol.33, 1-48.
- HENSLEE, S.P. and R.M.NEILSON, JR. (1985) Elemental volatility of HT-9 fusion reactor alloy. Fusion Technology, Vol. 8, 1392-1395.
- HOLDREN, J.P. (1981) Contribution of activation products to fusion accident risk : Part 1. A preliminary investigation. Nuclear Technology/Fusion, Vol. 1, 79-89.
- 石田好輝他（1986）知識工学的手法よるプラントの異常連鎖シミュレータ. 安全工学, Vol. 25, No. 2, 81-90.
- 関西国際空港株式会社（1985）関西国際空港建設事業に係る環境影響評価準備書. 512 pp.
- KASTENBERG, W.E. et al. (1979) On the safety of conceptual fusion-fission hybrid reactors. Nuclear Engineering and Design, Vol.51, 311-359.
- KAZIMI, M.S. (1983) Risk considerations for fusion energy. Nuclear Technology/Fusion, Vol.4, 527-532.
- LOGAN, B.G. et al. (1984) MARS - Mirror Advanced Reactor Study Final Report. UCRL-53480, Lawrence Livermore National Laboratory, Vol.1-A and 1-B.
- LONGHURST, G.R. et al. (1983) Gamma radiation effects on tritium permeation through stainless steel. Nuclear Technology/Fusion, Vol.4, 681-686.
- 松尾清一（1985）商業用原子力発電施設の廃止措置のあり方. 原子力工業, Vol. 31, No. 11, 13-17.
- MAYA, I. et al. (1985) Release of radioactive species from activated metallic blanket structures during fusion reactor accident conditions. GA Technologies Report GA-A17804, 36 pp.

- 日本原子力研究所 (1988a) JT-60 臨界プラズマ条件の達成と最近の加熱実験の成果. 日本原子力学会誌, Vol. 30, No. 4, 305-312.
- 日本原子力研究所 (1988b) 核融合次期装置設計 (昭和62年度設計検討報告書) -総合報告書-. JAERI-M88-090, 498 pp.
- PIET, S.J. et al. (1983) Modeling of fusion activation product release and reactor damage from rapid structural oxidation. Nuclear Technology/Fusion, Vol.4, 1115-1120.
- POWERS, D.A. et al. (1987) The Chernobyl Source Term. Nuclear Safety, Vol.28, No.1, 10-28.
- プラズマ研究所 (1985) 核融合炉システムの安全評価成果報告書. 名古屋大学, 235 pp.
- ROHWER, P.S. and W.H. WILCOX (1976) Radiological Aspects of Environmental Tritium. Nuclear Safety, Vol.17, No.2, 216-223.
- 斎藤龍生他 (1988) 核融合次期装置設計 (昭和62年度設計報告書) -プラントシステム設計-. JAERI-M88-083, 日本原子力研究所, 426 pp.
- SCHULTZ, K.R. et al. (1980) Hybrid reactor safety study second annual report. GA-A16185, General Atomic Company, 75 pp.
- 瀬尾健他 (1988) チェルノブイリ事故による放出放射能. 科学, Vol. 58, No. 2, 108-117.
- 島津康男編著 (1986) 核融合炉 SYSTEM ASSESSMENT MANUAL. エネルギー特別研究 (核融合) 「核融合炉のアセスメントに関する研究」, 232 pp.
- SZE, D.K. et al. (1985) An assessment of problems associated with tritium containment. Fusion Technology, Vol.8, 1985-1997.
- TILL, J.E., E.L. ETNIER and H.R. MEYER (1981) Methodologies for Calculating the Radiation Dose to Man from Environmental Releases of Tritium. Nuclear Safety, Vol.22, No.2, 205-213.
- 外川織彦他 (1988) ソ連チェルノブイル原子力発電所事故起因の我が国における被曝線量の推定. 日本原子力研究所, JAERI-M88-019, 48 pp.
- 東京都環境保全局 (1982) 環境影響評価制度の手引II (技術指針編). 324 pp.
- U.S. Atomic Energy Commission (1973) The Safety of Nuclear Power Reactors (Light Water-Cooled) and Related Facilities. WASH-1250, (Japanese ed. Sanpoh, (1975), 394 pp.).

U.S. Nuclear Regulatory Commission (1975) Standards for Protection Against Radiation. USNRC Rules and Regulations, Title 10, Chapter I, Part 20.

YAMAKI, T. et al. (1984) HIBLIC-I - conceptual design of heavy ion fusion reactor. IPPJ-663, Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ.

吉田芳和 (1979) 放射性廃棄物の区分境界値 (下限値) の明確化. 公害と対策, Vol. 15, No. 5, 677-681.

## 4. 結論

### 4-1. 本研究で得られた成果

本研究では核融合炉のサイエンス・アセスメントとして、(1)資源・経済アセスメントおよび(2)リスク・アセスメントを行った。本研究で得られた成果は以下のようにまとめられる。

#### (1)資源・経済アセスメント

- ・リチウムの確保は重要な問題で、エネルギー消費を減らすような抽出法、濃縮法の開発が必要であるが、その際、他産業への影響も考慮しなければならない。
- ・エネルギー比からみるとD-T炉は核分裂炉と競争可能である。
- ・エネルギー分析からみると ${}^6\text{Li}$ 濃縮を考える場合には、核融合におけるリチウムは核分裂におけるウランと類似した役割を果たし、リチウムは準燃料的な意味を持つ。
- ・核融合・核分裂ハイブリッド炉のエネルギー比は、電力生産、燃料生産のいずれを主にするかで差が大きくなるが、核分裂炉と組み合わせて考える場合には、それぞれ個別に考えるよりも有利になる。

#### (2)リスク・アセスメント

- ・核融合炉で発生する誘導放射能はブランケット構造材の選択に依存するため、低放射化材料の使用が望まれる。
- ・廃止措置に伴って発生する炉設備からの放射性廃棄物は、核分裂炉の原子炉圧力容器の場合に比べてD-T炉で20倍、D-D炉ではさらにその2倍となる。
- ・周辺公衆に対する安全性からはトリチウムの漏洩が最も重要で、必要な敷地面積はD-T炉で2 km $\times$ 2 km、D-D炉で1 km $\times$ 1 kmとなる。
- ・ハイブリッド炉における放射能は核分裂生成物とアクチノイドが支配的で、放射能レベルと毒性は共に核分裂炉と同程度あるいはそれよりも大きい。

### 4-2. 今後の課題

今後の課題として以下のような項目が挙げられる。

#### (1)資源・経済アセスメント

- ・エネルギー分析を用いて得られた結果の誤差を議論することは難しいが、少なくとも、材料によっては生産技術の向上などによってエネルギー・インテンシティ（EI）が変化したり、あるいは、新しい材料が開発されたりすることが考えられるため、EIデータベースを更新していくことが必要である。
- ・炉設備とドライバー・システムの材料エネルギーを除くと、その他の項目への投入エネルギーの計量にはほとんど核分裂炉のエネルギー分析を参考にした。日本原子力研究所（1988）の次期装置FERは自己点火・

長時間燃焼を目指す実験炉（核融合出力40.9MW<sub>t</sub>）であるが、この規模の実験炉などを参考にして、核融合炉固有のE Iデータベースを整備していく必要がある。

## (2) リスク・アセスメント

- ・廃止措置に伴って発生する炉設備からの放射性廃棄物の量を核分裂炉の原子炉圧力容器からの場合と比較したが、使用済み燃料に関しては考慮されていない。放射性廃棄物の発生量を、核融合炉と核分裂炉について、運転開始から廃止措置までの積分値として求めた場合の比較を行う必要がある。
- ・周辺公衆に対する安全性からはトリチウムが最も重要となるため、計算モデル、漏洩量、放射能から被曝線量への換算率、さらに、食物摂取による影響などを再検討して、計算精度の向上に努める必要がある。
- ・事故時の異常連鎖の解析は、核融合炉システムの構造的安全性を評価する上で重要であるため、知識ベースをさらに拡充して実用となるレベルまで高めて行く必要がある。

## (3) 環境アセスメント

- ・日本原子力研究所の次期装置FERは、核融合出力40.9MW<sub>t</sub>（ピーク値）、トリチウム・インベントリー約2kg、敷地面積450m×600m（斎藤他、1988）で、環境アセスメントの実施が必要な規模となっている。FERを対象にして環境アセスメントを実施し、評価手法の開発や、商業炉を想定した場合の問題点を具体的に探る必要がある。

## 〔第四章参考文献〕

日本原子力研究所（1988）核融合次期装置設計（昭和62年度設計検討報告書）－総合報告書－。JAER

I-M88-090, 498pp.

斎藤龍生他（1988）核融合次期装置設計（昭和62年度設計報告書）－プラントシステム設計－。JAER

I-M88-083, 日本原子力研究所, 426pp.

## 謝辞

この論文をまとめるにあたって、今日まで指導、激励して下さいました島津康男名古屋大学理学部教授に心から感謝致します。また、数々の有益な助言をいただいた、浦部達夫名古屋大学大型計算機センター教授、ならびに、長谷川明生名古屋大学理学部助手にも謝意を表します。

## Appendix A

Table A中の物量の単位は以下の通りである。

kg	キログラム
no	個、本など
mt	トン
th	$10^3$ 個、 $10^3$ 枚など
kmt	$10^3$ トン
kno	$10^3$ 個、 $10^3$ 枚など
sm	$m^2$
cm	$m^3$
kl	キロリットル
ren	連
ksm	$10^3 m^2$
kcm	$10^3 m^3$
kk1	$10^3$ キロリットル
mkw	$10^6$ kwh
gcl	$10^9$ cal
myn	百万円

Table A. Energy Intensity for 554 Goods and Services in 1980.

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
1	mt	$2.6491 \times 10^6$	$3.4180 \times 10^2$	$2.8213 \times 10^6$	Brown rice
2	mt	$1.7780 \times 10^5$	$2.2942 \times 10^1$	$1.8937 \times 10^5$	Rice straw
3	mt	$2.9262 \times 10^6$	$3.0315 \times 10^2$	$3.0790 \times 10^6$	Barley(domestic)
4	mt	$3.5562 \times 10^6$	$3.0315 \times 10^2$	$3.7090 \times 10^6$	Barley(imported)
5	mt	$3.3188 \times 10^6$	$3.4383 \times 10^2$	$3.4921 \times 10^6$	Naked barley
6	mt	$3.1816 \times 10^6$	$3.2962 \times 10^2$	$3.3477 \times 10^6$	Wheat(domestic)
7	mt	$3.8116 \times 10^6$	$3.2962 \times 10^2$	$3.9777 \times 10^6$	Wheat(imported)
8	mt	$3.2462 \times 10^6$	$3.3631 \times 10^2$	$3.4157 \times 10^6$	Barley for beer
9	mt	$2.5460 \times 10^7$	$2.6377 \times 10^3$	$2.6789 \times 10^7$	Other barley and wheat
10	myn	$1.4379 \times 10^7$	$1.6281 \times 10^3$	$1.5200 \times 10^7$	Vegetables
11	mt	$8.9014 \times 10^5$	$1.1371 \times 10^2$	$9.4746 \times 10^5$	Citrus fruits
12	mt	$1.4557 \times 10^6$	$1.8596 \times 10^2$	$1.5494 \times 10^6$	Apple
13	myn	$1.0918 \times 10^7$	$1.3947 \times 10^3$	$1.1621 \times 10^7$	Other fruits
14	mt	$8.8584 \times 10^5$	$1.0838 \times 10^2$	$9.4046 \times 10^5$	Sweet potato
15	mt	$4.8337 \times 10^5$	$5.9141 \times 10^1$	$5.1318 \times 10^5$	White potato
16	mt	$4.1758 \times 10^6$	$4.2378 \times 10^2$	$4.3894 \times 10^6$	Corn and koaliang(imported)
17	mt	$3.5458 \times 10^6$	$4.2378 \times 10^2$	$3.7594 \times 10^6$	Other cereals
18	mt	$2.1024 \times 10^6$	$2.7245 \times 10^2$	$2.2398 \times 10^6$	Soybean(domestic)
19	mt	$2.7324 \times 10^6$	$2.7245 \times 10^2$	$2.8698 \times 10^6$	Soybean(imported)
20	mt	$4.5454 \times 10^6$	$5.8902 \times 10^2$	$4.8422 \times 10^6$	Other pulses
21	mt	$6.5121 \times 10^6$	$9.5303 \times 10^2$	$6.9924 \times 10^6$	Rapeseed
22	myn	$1.4056 \times 10^7$	$2.0571 \times 10^3$	$1.5093 \times 10^7$	Other field crops for edible oil
23	mt	$2.5852 \times 10^5$	$3.3474 \times 10^1$	$2.7539 \times 10^5$	Field crops for sugar
24	mt	$3.3195 \times 10^6$	$3.6993 \times 10^2$	$3.5059 \times 10^6$	Coffee bean and cocoa bean(imported)
25	mt	$2.6895 \times 10^6$	$3.6993 \times 10^2$	$2.8759 \times 10^6$	Other crops for beverages
26	myn	$2.9806 \times 10^7$	$1.1477 \times 10^3$	$3.0384 \times 10^7$	Spices(imported)
27	mt	$1.8836 \times 10^6$	$2.1391 \times 10^2$	$1.9914 \times 10^6$	Edible field crops for non-fiber industrial process
28	mt	$6.1323 \times 10^4$	$6.9641 \times 10^0$	$6.4833 \times 10^4$	Edible field crops,n.e.c.
29	mt	$2.3242 \times 10^7$	$1.7462 \times 10^3$	$2.4122 \times 10^7$	Leaf tobacco
30	mt	$1.9406 \times 10^6$	$1.7502 \times 10^2$	$2.0288 \times 10^6$	Raw rubber
31	myn	$4.7191 \times 10^6$	$6.3021 \times 10^2$	$5.0368 \times 10^6$	Field crops for medicine
32	mt	$3.8829 \times 10^6$	$5.1853 \times 10^2$	$4.1442 \times 10^6$	Field crops for paper
33	mt	$1.3106 \times 10^6$	$1.7502 \times 10^2$	$1.3988 \times 10^6$	Filed crops for matting
34	mt	$1.9406 \times 10^6$	$1.7502 \times 10^2$	$2.0288 \times 10^6$	Colton
35	kg	$7.1662 \times 10^2$	$9.5699 \times 10^{-2}$	$7.6485 \times 10^2$	Other field crops for textile
36	myn	$4.7191 \times 10^6$	$6.3021 \times 10^2$	$5.0368 \times 10^6$	Other field crops inedible for other industrial process
37	myn	$1.6193 \times 10^7$	$1.3958 \times 10^3$	$1.6896 \times 10^7$	Nursery
38	myn	$1.6193 \times 10^7$	$1.3958 \times 10^3$	$1.6896 \times 10^7$	Crops for manure
39	myn	$1.6193 \times 10^7$	$1.3958 \times 10^3$	$1.6896 \times 10^7$	Other field crops inedible,n.e.c.
40	myn	$1.7407 \times 10^7$	$2.2369 \times 10^3$	$1.8534 \times 10^7$	Milk
41	myn	$1.7407 \times 10^7$	$2.2369 \times 10^3$	$1.8534 \times 10^7$	Calf for meat
42	myn	$1.7407 \times 10^7$	$2.2369 \times 10^3$	$1.8534 \times 10^7$	Other dairy products
43	mt	$1.7215 \times 10^7$	$2.0537 \times 10^3$	$1.8250 \times 10^7$	Egg
44	mt	$2.0607 \times 10^7$	$2.4583 \times 10^3$	$2.1846 \times 10^7$	Poultry meat
45	myn	$5.0063 \times 10^7$	$5.9723 \times 10^3$	$5.3073 \times 10^7$	Other poultry products
46	no	$1.4608 \times 10^6$	$1.6872 \times 10^2$	$1.5458 \times 10^6$	Pig
47	myn	$3.7528 \times 10^7$	$4.3347 \times 10^3$	$3.9713 \times 10^7$	Other pig raising products
48	mt	$1.5203 \times 10^7$	$1.7368 \times 10^3$	$1.6078 \times 10^7$	Beef cattle meat
49	myn	$2.9397 \times 10^7$	$3.3584 \times 10^3$	$3.1090 \times 10^7$	Other beef cattle products
50	kg	$1.1492 \times 10^4$	$1.3776 \times 10^0$	$1.2186 \times 10^4$	Wool

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
51	myn	$2.6671 \times 10^7$	$3.1970 \times 10^3$	$2.8282 \times 10^7$	Meat by other stock-raising
52	myn	$2.6671 \times 10^7$	$3.1970 \times 10^3$	$2.8282 \times 10^7$	Other beef raising products
53	myn	$9.4612 \times 10^6$	$1.3446 \times 10^3$	$1.0139 \times 10^7$	Silk cocoon
54	myn	$9.4612 \times 10^6$	$1.3446 \times 10^3$	$1.0139 \times 10^7$	By-products of sericulture
55	myn	$6.9494 \times 10^6$	$7.9072 \times 10^2$	$7.3479 \times 10^6$	Farrier
56	myn	$8.0204 \times 10^6$	$1.6795 \times 10^3$	$8.8669 \times 10^6$	Agricultural services
57	th	$1.4091 \times 10^5$	$1.2464 \times 10^1$	$1.4720 \times 10^5$	Forest planting and conservation
58	mt	$1.1802 \times 10^7$	$5.8950 \times 10^2$	$1.2099 \times 10^7$	Uncultivated forest products
59	mt	$7.1347 \times 10^6$	$1.6541 \times 10^1$	$7.1430 \times 10^6$	Charcoal
60	kno	$2.7698 \times 10^8$	$3.6572 \times 10^2$	$2.7716 \times 10^8$	Firewood
61	kno	$4.5900 \times 10^6$	$6.6502 \times 10^2$	$4.9252 \times 10^6$	Hunting
62	kcm	$1.1920 \times 10^8$	$8.9241 \times 10^3$	$1.2370 \times 10^8$	Log(domestic)
63	kcm	$5.4010 \times 10^8$	$8.9480 \times 10^3$	$5.4461 \times 10^8$	Log(imported)
64	mt	$6.3658 \times 10^6$	$3.0952 \times 10^2$	$6.5218 \times 10^6$	Coastal water fishing
65	mt	$6.4257 \times 10^6$	$2.2323 \times 10^2$	$6.5382 \times 10^6$	Ocean and off-shore water fishing
66	mt	$5.4990 \times 10^6$	$3.7002 \times 10^2$	$5.6855 \times 10^6$	Sea-shore water culture
67	no	$1.2639 \times 10^8$	$4.3683 \times 10^3$	$1.2859 \times 10^8$	Whaling
68	mt	$4.6074 \times 10^6$	$2.1849 \times 10^2$	$4.7176 \times 10^6$	Inland water fishing
69	mt	$1.9413 \times 10^7$	$3.1218 \times 10^3$	$2.0986 \times 10^7$	Inland water culture
70	mt	$8.1762 \times 10^6$	$1.4234 \times 10^2$	$8.2480 \times 10^6$	Coking coal(domestic)
71	mt	$8.3300 \times 10^6$	$1.4234 \times 10^2$	$8.4017 \times 10^6$	Coking coal(imported)
72	mt	$6.0038 \times 10^6$	$9.3701 \times 10^1$	$6.0510 \times 10^6$	Coal for general use
73	mt	$4.1984 \times 10^6$	$7.2839 \times 10^1$	$4.2351 \times 10^6$	Anthracite(domestic)
74	mt	$4.6000 \times 10^6$	$7.2839 \times 10^1$	$4.6367 \times 10^6$	Anthracite(imported)
75	mt	$4.4755 \times 10^6$	$1.1979 \times 10^2$	$4.5359 \times 10^6$	Lignite
76	mt	$7.5639 \times 10^4$	$2.0148 \times 10^1$	$8.5794 \times 10^4$	Iron ore(domestic)
77	mt	$6.6000 \times 10^5$	$5.2070 \times 10^1$	$6.8624 \times 10^5$	Iron ore(imported)
78	mt	$1.3430 \times 10^5$	$3.8560 \times 10^1$	$1.5373 \times 10^5$	Iron sand
79	mt	$2.7691 \times 10^6$	$6.9554 \times 10^2$	$3.1197 \times 10^6$	Copper ore
80	mt	$3.5264 \times 10^6$	$8.3307 \times 10^2$	$3.9462 \times 10^6$	Lead ore
81	mt	$2.3243 \times 10^6$	$6.2455 \times 10^2$	$2.6391 \times 10^6$	Zinc ore
82	myn	$9.2217 \times 10^6$	$2.0480 \times 10^3$	$1.0254 \times 10^7$	Other non-ferrous metal ores
83	kl	$1.0196 \times 10^7$	$1.7075 \times 10^2$	$1.0282 \times 10^7$	Crude petroleum(domestic)
84	kl	$9.7800 \times 10^6$	$1.7075 \times 10^2$	$9.8661 \times 10^6$	Crude petroleum(imported)
85	myn	$2.9025 \times 10^8$	$4.8098 \times 10^3$	$2.9267 \times 10^8$	Natural gas
86	mt	$1.5486 \times 10^4$	$2.5837 \times 10^0$	$1.6789 \times 10^4$	Limestone
87	myn	$2.2753 \times 10^7$	$3.9226 \times 10^3$	$2.4730 \times 10^7$	Materials for ceramics
88	myn	$2.5738 \times 10^7$	$1.1832 \times 10^3$	$2.6335 \times 10^7$	Gravel and building stone
89	myn	$2.5781 \times 10^7$	$5.5198 \times 10^3$	$2.8563 \times 10^7$	Sulfid ore
90	myn	$5.0450 \times 10^7$	$8.8920 \times 10^3$	$5.4932 \times 10^7$	Sulfur
91	myn	$5.2280 \times 10^7$	$9.2140 \times 10^3$	$5.6924 \times 10^7$	Crude salt
92	myn	$3.2263 \times 10^7$	$6.9929 \times 10^3$	$3.5787 \times 10^7$	Other non-metal ores
93	mt	$2.5648 \times 10^7$	$3.0851 \times 10^3$	$2.7203 \times 10^7$	Quarters
94	no	$2.7840 \times 10^4$	$3.3488 \times 10^0$	$2.9528 \times 10^4$	Hide and skin
95	mt	$1.0628 \times 10^6$	$1.2784 \times 10^2$	$1.1272 \times 10^6$	By-products of slaughtering
96	mt	$1.1484 \times 10^7$	$1.3814 \times 10^3$	$1.2180 \times 10^7$	Fowl meat
97	mt	$8.6597 \times 10^6$	$1.0417 \times 10^3$	$9.1848 \times 10^6$	By-products of fowl butchering
98	mt	$9.2775 \times 10^6$	$1.4677 \times 10^3$	$1.0017 \times 10^7$	Canned or bottled meat products
99	mt	$2.3741 \times 10^7$	$2.8126 \times 10^3$	$2.5159 \times 10^7$	Meat products
100	mt	$4.7056 \times 10^6$	$5.1941 \times 10^2$	$4.9674 \times 10^6$	Lard(refined)

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
101	mt	$3.2387 \times 10^6$	$3.5749 \times 10^2$	$3.4189 \times 10^6$	Inedible animal oils and fats
102	kl	$3.2819 \times 10^6$	$4.8197 \times 10^2$	$3.5248 \times 10^6$	Drinking milk
103	mt	$1.2944 \times 10^7$	$1.9009 \times 10^3$	$1.3902 \times 10^7$	Dairy products
104	mt	$6.5357 \times 10^6$	$8.3972 \times 10^2$	$6.9589 \times 10^6$	Canned or bottled vegetables and fruits
105	myn	$1.0037 \times 10^7$	$1.4510 \times 10^3$	$1.0768 \times 10^7$	Other vegetables and fruits
106	mt	$1.3941 \times 10^7$	$1.1864 \times 10^3$	$1.4539 \times 10^7$	Canned or bottled marine products
107	mt	$7.1628 \times 10^6$	$5.8333 \times 10^2$	$7.4568 \times 10^6$	Kneaded fish meat
108	mt	$1.5955 \times 10^7$	$1.2881 \times 10^3$	$1.6605 \times 10^7$	Other processed fish meat
109	mt	$6.4817 \times 10^6$	$3.9380 \times 10^2$	$6.6802 \times 10^6$	Refrigerated fishes and shell fishes
110	mt	$1.7263 \times 10^7$	$1.4584 \times 10^3$	$1.7998 \times 10^7$	Salted, dried and smoked marine products
111	mt	$2.7597 \times 10^6$	$1.9616 \times 10^2$	$2.8586 \times 10^6$	Fish oils and scraps
112	kmt	$3.6366 \times 10^9$	$5.0155 \times 10^5$	$3.8894 \times 10^9$	Cleaned rice(domestic)
113	mt	$4.2666 \times 10^6$	$5.0155 \times 10^2$	$4.5194 \times 10^6$	Cleaned rice(imported)
114	mt	$4.6014 \times 10^5$	$6.3460 \times 10^1$	$4.9212 \times 10^5$	Other cleaned grains
115	mt	$4.4138 \times 10^6$	$5.2112 \times 10^2$	$4.6765 \times 10^6$	Wheat flour
116	mt	$2.1170 \times 10^6$	$2.4994 \times 10^2$	$2.2429 \times 10^6$	Other flour
117	mt	$1.0131 \times 10^7$	$1.5974 \times 10^3$	$1.0936 \times 10^7$	Breads
118	mt	$1.6067 \times 10^7$	$2.5334 \times 10^3$	$1.7344 \times 10^7$	Confectioneries
119	mt	$2.4863 \times 10^6$	$2.7278 \times 10^2$	$2.6238 \times 10^6$	Refined sugar(domestic materials)
120	mt	$2.5456 \times 10^6$	$2.7929 \times 10^2$	$2.6864 \times 10^6$	Refined sugar(imported materials)
121	mt	$4.4662 \times 10^4$	$4.9000 \times 10^0$	$4.7132 \times 10^4$	By-products of sugar manufacturing
122	mt	$7.8738 \times 10^6$	$9.4653 \times 10^2$	$8.3508 \times 10^6$	Cooking rapeseed oil
123	mt	$8.3968 \times 10^6$	$1.0094 \times 10^3$	$8.9055 \times 10^6$	Cooking soybean oil
124	mt	$1.0573 \times 10^7$	$1.2710 \times 10^3$	$1.1213 \times 10^7$	Other cooking oil and cooking oil products
125	mt	$1.0974 \times 10^7$	$1.3192 \times 10^3$	$1.1639 \times 10^7$	Inedible vegetable oils and fats
126	mt	$3.0124 \times 10^6$	$3.6213 \times 10^2$	$3.1949 \times 10^6$	Vegetable oil waste
127	mt	$1.2479 \times 10^7$	$1.7100 \times 10^3$	$1.3341 \times 10^7$	Condiments
128	mt	$1.0605 \times 10^7$	$1.3893 \times 10^3$	$1.1305 \times 10^7$	Noodles
129	mt	$7.7806 \times 10^6$	$1.1905 \times 10^3$	$8.3807 \times 10^6$	Potato starch
130	mt	$5.9496 \times 10^6$	$9.1037 \times 10^2$	$6.4085 \times 10^6$	Other starches and lees
131	mt	$4.7072 \times 10^6$	$7.0624 \times 10^2$	$5.0631 \times 10^6$	Liquid jelly and glucose
132	mt	$1.4356 \times 10^6$	$1.9192 \times 10^2$	$1.5323 \times 10^6$	Edible salt
133	mt	$1.9931 \times 10^5$	$9.0897 \times 10^1$	$2.4512 \times 10^5$	Ice
134	mt	$2.7129 \times 10^7$	$3.1027 \times 10^3$	$2.8693 \times 10^7$	Finished tea and coffee
135	myn	$1.4412 \times 10^7$	$1.9962 \times 10^3$	$1.5418 \times 10^7$	Other food preparations
136	mt	$4.7837 \times 10^6$	$5.1981 \times 10^2$	$5.0457 \times 10^6$	Prepared feeds for animal and poultry
137	kl	$5.2239 \times 10^6$	$8.9005 \times 10^2$	$5.6725 \times 10^6$	Brewed sake
138	kl	$2.5836 \times 10^6$	$4.0302 \times 10^2$	$2.7867 \times 10^6$	Beer
139	kg	$2.8825 \times 10^7$	$1.7684 \times 10^3$	$2.9716 \times 10^7$	Ethyl alcohol for liquor manufacturing
140	kl	$1.2352 \times 10^7$	$1.8769 \times 10^3$	$1.3298 \times 10^7$	Whisky
141	kl	$5.9385 \times 10^6$	$7.9142 \times 10^2$	$6.3374 \times 10^6$	Other liquors
142	kl	$2.7751 \times 10^6$	$5.1660 \times 10^2$	$3.0355 \times 10^6$	Soft drinks
143	myn	$5.4698 \times 10^6$	$8.8919 \times 10^2$	$5.9179 \times 10^6$	Tobacco products
144	mt	$1.1786 \times 10^8$	$1.7640 \times 10^4$	$1.2676 \times 10^8$	Silk-reeling
145	mt	$6.1786 \times 10^7$	$1.4167 \times 10^4$	$6.8927 \times 10^7$	Spun silk yarn
146	mt	$8.3841 \times 10^6$	$2.7169 \times 10^3$	$9.7535 \times 10^6$	Cotton yarn
147	mt	$2.9115 \times 10^7$	$6.1606 \times 10^3$	$3.2220 \times 10^7$	Woollen yarn
148	mt	$1.0049 \times 10^7$	$1.6708 \times 10^3$	$1.0891 \times 10^7$	Hempen yarn
149	mt	$1.3424 \times 10^7$	$4.3447 \times 10^3$	$1.5614 \times 10^7$	Rayon yarn
150	mt	$2.1354 \times 10^7$	$3.3276 \times 10^3$	$2.3031 \times 10^7$	Vinylon yarn

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
151	mt	$2.3292 \times 10^7$	$3.6297 \times 10^3$	$2.5122 \times 10^7$	Nylon yarn
152	mt	$2.6399 \times 10^7$	$4.1138 \times 10^3$	$2.8473 \times 10^7$	Acrylonitrilic fiber yarn
153	mt	$2.5544 \times 10^7$	$3.9806 \times 10^3$	$2.7550 \times 10^7$	Ester fiber yarn
154	myn	$3.1232 \times 10^7$	$4.8669 \times 10^3$	$3.3685 \times 10^7$	Other synthetic fiber yarns
155	myn	$1.1667 \times 10^7$	$2.5326 \times 10^3$	$1.2944 \times 10^7$	Silk fabric
156	myn	$2.0671 \times 10^7$	$5.0022 \times 10^3$	$2.3192 \times 10^7$	Artificial silk fabric
157	myn	$1.2547 \times 10^7$	$3.2912 \times 10^3$	$1.4206 \times 10^7$	Cotton fabric
158	myn	$1.6670 \times 10^7$	$3.9181 \times 10^3$	$1.8645 \times 10^7$	Narrow cotton fabric
159	myn	$1.6973 \times 10^7$	$4.9033 \times 10^3$	$1.9445 \times 10^7$	Rayon fabric
160	ksm	$1.0252 \times 10^7$	$1.8893 \times 10^3$	$1.1204 \times 10^7$	Synthetic fiber fabric
161	ksm	$1.6531 \times 10^7$	$3.7957 \times 10^3$	$1.8444 \times 10^7$	Woollen fabric
162	mt	$7.2956 \times 10^7$	$1.6751 \times 10^4$	$8.1399 \times 10^7$	Woven felt
163	myn	$1.5452 \times 10^7$	$3.1230 \times 10^3$	$1.7026 \times 10^7$	Hempen fabric
164	myn	$2.1776 \times 10^7$	$4.2714 \times 10^3$	$2.3929 \times 10^7$	Yarn and fabric dyeing and finishing
165	myn	$1.6692 \times 10^7$	$3.4955 \times 10^3$	$1.8453 \times 10^7$	Knitted fabric
166	myn	$6.2040 \times 10^6$	$1.0779 \times 10^3$	$6.7473 \times 10^6$	Straw products
167	th	$5.6551 \times 10^6$	$9.3724 \times 10^2$	$6.1275 \times 10^6$	Rush products
168	myn	$1.3189 \times 10^7$	$2.4321 \times 10^3$	$1.4415 \times 10^7$	Cotton and carpet
169	myn	$1.7299 \times 10^7$	$2.9739 \times 10^3$	$1.8798 \times 10^7$	Rope and fish net
170	myn	$1.1566 \times 10^7$	$2.3994 \times 10^3$	$1.2775 \times 10^7$	Made-up textile goods for home use
171	myn	$1.5473 \times 10^7$	$3.9231 \times 10^3$	$1.7451 \times 10^7$	Made-up textile goods for other uses
172	myn	$8.7048 \times 10^6$	$1.9221 \times 10^3$	$9.6736 \times 10^6$	Textile for medical use
173	myn	$1.3074 \times 10^7$	$2.8083 \times 10^3$	$1.4489 \times 10^7$	Other fiber products
174	myn	$9.3931 \times 10^6$	$2.0890 \times 10^3$	$1.0446 \times 10^7$	Wooden footwear
175	myn	$9.4613 \times 10^6$	$1.6202 \times 10^3$	$1.0278 \times 10^7$	Leather footwear
176	myn	$1.0169 \times 10^7$	$2.4130 \times 10^3$	$1.1385 \times 10^7$	Other footwear(except rubber)
177	myn	$1.2700 \times 10^7$	$2.7104 \times 10^3$	$1.4066 \times 10^7$	Wearing apparel
178	myn	$1.4882 \times 10^7$	$2.7223 \times 10^3$	$1.6254 \times 10^7$	Apparel accessories
179	kcm	$4.7708 \times 10^8$	$5.0276 \times 10^4$	$5.0242 \times 10^8$	Lumber
180	ksm	$7.8263 \times 10^6$	$1.2711 \times 10^3$	$8.4670 \times 10^6$	Plywood
181	kcm	$1.0995 \times 10^8$	$1.9907 \times 10^4$	$1.1998 \times 10^8$	Chip
182	myn	$1.1223 \times 10^7$	$2.7421 \times 10^3$	$1.2605 \times 10^7$	Wooden products for construction
183	myn	$1.1223 \times 10^7$	$2.7421 \times 10^3$	$1.2605 \times 10^7$	Other wooden products
184	myn	$1.2645 \times 10^7$	$2.4641 \times 10^3$	$1.3887 \times 10^7$	Wooden furniture and fixtures
185	myn	$1.0631 \times 10^7$	$2.0389 \times 10^3$	$1.1659 \times 10^7$	Other wooden furniture
186	myn	$2.2571 \times 10^7$	$4.2508 \times 10^3$	$2.4713 \times 10^7$	Metallic furniture
187	mt	$4.8943 \times 10^6$	$1.2381 \times 10^3$	$5.5183 \times 10^6$	Dissolving pulp
188	mt	$2.0609 \times 10^6$	$6.1714 \times 10^2$	$2.3720 \times 10^6$	Paper pulp
189	myn	$3.0511 \times 10^7$	$9.8802 \times 10^3$	$3.5490 \times 10^7$	Foreign paper and japanese paper
190	myn	$3.0184 \times 10^7$	$1.1826 \times 10^4$	$3.6145 \times 10^7$	Paperboard
191	myn	$1.2206 \times 10^7$	$3.1506 \times 10^3$	$1.3794 \times 10^7$	Fiberboard
192	ksm	$2.5469 \times 10^6$	$7.3613 \times 10^2$	$2.9179 \times 10^6$	Corrugated cardboard
193	myn	$2.1786 \times 10^7$	$6.2968 \times 10^3$	$2.4959 \times 10^7$	Coated paper and paper converted for construction use
194	myn	$1.8816 \times 10^7$	$5.6410 \times 10^3$	$2.1659 \times 10^7$	Paper container
195	myn	$1.3823 \times 10^7$	$4.0193 \times 10^3$	$1.5849 \times 10^7$	Other paper articles
196	ren	$2.2791 \times 10^5$	$7.0075 \times 10^1$	$2.6323 \times 10^5$	Cellophane
197	myn	$1.1180 \times 10^7$	$3.2035 \times 10^3$	$1.2794 \times 10^7$	Newspaper
198	myn	$1.2556 \times 10^7$	$3.6362 \times 10^3$	$1.4388 \times 10^7$	Printing
199	myn	$1.2354 \times 10^7$	$3.2872 \times 10^3$	$1.4011 \times 10^7$	Publishing
200	myn	$2.0302 \times 10^7$	$3.0295 \times 10^3$	$2.1829 \times 10^7$	Leather and fur products

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
201	myn	$1.4404 \times 10^7$	$2.2856 \times 10^3$	$1.5556 \times 10^7$	Leather products
202	myn	$2.6843 \times 10^7$	$3.1197 \times 10^3$	$2.8416 \times 10^7$	Tire and tube
203	myn	$2.6843 \times 10^7$	$3.1197 \times 10^3$	$2.8416 \times 10^7$	Other rubber products
204	myn	$2.2288 \times 10^7$	$3.1938 \times 10^3$	$2.3897 \times 10^7$	Rubber footwear
205	mt	$8.4468 \times 10^6$	$1.0717 \times 10^3$	$8.9869 \times 10^6$	Ammonia
206	mt	$1.8092 \times 10^5$	$5.5218 \times 10^1$	$2.0875 \times 10^5$	Sulfuric acid
207	mt	$7.9930 \times 10^6$	$1.5639 \times 10^3$	$8.7812 \times 10^6$	Carbide
208	mt	$2.7232 \times 10^6$	$1.0754 \times 10^3$	$3.2652 \times 10^6$	Soda ash
209	mt	$2.9458 \times 10^6$	$1.1632 \times 10^3$	$3.5321 \times 10^6$	Caustic soda
210	mt	$3.3289 \times 10^6$	$1.3145 \times 10^3$	$3.9914 \times 10^6$	Liquid chlorine
211	myn	$5.8873 \times 10^7$	$2.3248 \times 10^4$	$7.0590 \times 10^7$	Hydrochloric acid
212	myn	$5.8873 \times 10^7$	$2.3248 \times 10^4$	$7.0590 \times 10^7$	Other soda industrial chemicals
213	mt	$2.1284 \times 10^7$	$5.4843 \times 10^2$	$2.1561 \times 10^7$	Pure benzol
214	mt	$9.1418 \times 10^6$	$2.3556 \times 10^2$	$9.2605 \times 10^6$	Creosote oil
215	mt	$9.5389 \times 10^6$	$2.4579 \times 10^2$	$9.6627 \times 10^6$	Pitch
216	mt	$2.8587 \times 10^7$	$7.3659 \times 10^2$	$2.8958 \times 10^7$	Refined naphthalene
217	myn	$1.7382 \times 10^8$	$4.4789 \times 10^3$	$1.7608 \times 10^8$	Other tar chemicals
218	mt	$1.0979 \times 10^7$	$1.3717 \times 10^3$	$1.1670 \times 10^7$	Aniline
219	mt	$7.8386 \times 10^6$	$9.7938 \times 10^2$	$8.3323 \times 10^6$	Phthalic anhydride
220	myn	$4.2071 \times 10^7$	$5.2565 \times 10^3$	$4.4720 \times 10^7$	Other cyclic intermediates
221	kl	$1.3890 \times 10^7$	$1.8607 \times 10^3$	$1.4828 \times 10^7$	Ethyl alcohol
222	mt	$7.5660 \times 10^6$	$5.8189 \times 10^2$	$7.8593 \times 10^6$	Refined methanol
223	mt	$4.2807 \times 10^6$	$3.2922 \times 10^2$	$4.4466 \times 10^6$	Formalin
224	myn	$8.1889 \times 10^7$	$6.2980 \times 10^3$	$8.5064 \times 10^7$	Other methanol derivatives
225	myn	$6.8506 \times 10^7$	$6.7452 \times 10^3$	$7.1906 \times 10^7$	Acetylene derivatives
226	myn	$5.8784 \times 10^7$	$4.7645 \times 10^3$	$6.1185 \times 10^7$	Plasticizers
227	mt	$1.4706 \times 10^7$	$1.4741 \times 10^3$	$1.5449 \times 10^7$	Refined glycerine
228	myn	$4.6079 \times 10^7$	$4.6189 \times 10^3$	$4.8407 \times 10^7$	Other oil and fat industrial chemicals
229	mt	$2.2047 \times 10^7$	$8.8300 \times 10^2$	$2.2492 \times 10^7$	Ethylene(petroleum)
230	mt	$1.5854 \times 10^7$	$6.3499 \times 10^2$	$1.6174 \times 10^7$	Polypropylene(petroleum)
231	myn	$1.2166 \times 10^8$	$4.8725 \times 10^3$	$1.2411 \times 10^8$	Other petrochemical basic products
232	mt	$1.4229 \times 10^7$	$5.6185 \times 10^2$	$1.4512 \times 10^7$	Pure benzol(petroleum)
233	mt	$1.1425 \times 10^7$	$4.5116 \times 10^2$	$1.1653 \times 10^7$	Pure toluole(petroleum)
234	mt	$1.2007 \times 10^7$	$4.7412 \times 10^2$	$1.2246 \times 10^7$	Xyloles(petroleum)
235	myn	$1.0483 \times 10^8$	$4.1394 \times 10^3$	$1.0692 \times 10^8$	Other petrochemical aromatic products
236	mt	$1.7996 \times 10^7$	$1.0250 \times 10^3$	$1.8513 \times 10^7$	Phthalic anhydride(petroleum)
237	mt	$2.3004 \times 10^7$	$1.3103 \times 10^3$	$2.3665 \times 10^7$	Styrene(petroleum)
238	mt	$1.3030 \times 10^7$	$7.4215 \times 10^2$	$1.3404 \times 10^7$	Acetic acid(petroleum)
239	mt	$1.4138 \times 10^7$	$8.0523 \times 10^2$	$1.4543 \times 10^7$	Acetone(petroleum)
240	mt	$1.7205 \times 10^7$	$9.7996 \times 10^2$	$1.7699 \times 10^7$	Butanol(petroleum)
241	mt	$3.3170 \times 10^7$	$1.8893 \times 10^3$	$3.4123 \times 10^7$	Synthetic rubber
242	myn	$9.0084 \times 10^7$	$5.1309 \times 10^3$	$9.2670 \times 10^7$	Other petrochemical products
243	mt	$2.1299 \times 10^7$	$4.7316 \times 10^3$	$2.3684 \times 10^7$	Artificial silk
244	mt	$1.4301 \times 10^7$	$3.8825 \times 10^3$	$1.6258 \times 10^7$	Rayon
245	mt	$1.8837 \times 10^7$	$2.1964 \times 10^3$	$1.9944 \times 10^7$	Cellulose acetate
246	mt	$1.1011 \times 10^7$	$1.2838 \times 10^3$	$1.1658 \times 10^7$	Vinyl acetate
247	mt	$1.9530 \times 10^7$	$2.2772 \times 10^3$	$2.0678 \times 10^7$	Polyvinyl alcohol
248	myn	$4.9691 \times 10^7$	$5.7938 \times 10^3$	$5.2612 \times 10^7$	Other synthetic resins for fiber
249	mt	$2.5051 \times 10^7$	$3.7738 \times 10^3$	$2.6954 \times 10^7$	Vinylon fiber
250	mt	$3.0232 \times 10^7$	$5.3068 \times 10^3$	$3.2907 \times 10^7$	Nylon fiber

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
251	mt	$3.8268 \times 10^7$	$5.0031 \times 10^3$	$4.0790 \times 10^7$	Acrylonitrile fiber
252	mt	$3.5572 \times 10^7$	$5.6250 \times 10^3$	$3.8407 \times 10^7$	Ester fiber
253	myn	$5.3933 \times 10^7$	$6.4707 \times 10^3$	$5.7194 \times 10^7$	Other synthetic fiber materials
254	myn	$4.9011 \times 10^7$	$5.3318 \times 10^3$	$5.1698 \times 10^7$	Thermo-setting plastic
255	mt	$1.0316 \times 10^7$	$8.9402 \times 10^2$	$1.0767 \times 10^7$	Vinyl chloride monomer
256	mt	$1.3550 \times 10^7$	$1.1743 \times 10^3$	$1.4142 \times 10^7$	Vinyl chloride plastic
257	myn	$8.5126 \times 10^7$	$4.8809 \times 10^3$	$8.7586 \times 10^7$	Petroleum plastic
258	myn	$3.3454 \times 10^7$	$3.8360 \times 10^3$	$3.5387 \times 10^7$	Other plastics
259	mt	$1.0456 \times 10^6$	$1.3505 \times 10^2$	$1.1137 \times 10^6$	Ammonium sulfate
260	mt	$1.0709 \times 10^6$	$1.3831 \times 10^2$	$1.1406 \times 10^6$	Urea
261	mt	$1.0457 \times 10^6$	$1.3506 \times 10^2$	$1.1138 \times 10^6$	Ammonium chloride
262	mt	$3.9007 \times 10^6$	$5.0378 \times 10^2$	$4.1546 \times 10^6$	Ammonium nitrate
263	mt	$3.9813 \times 10^6$	$5.1420 \times 10^2$	$4.2405 \times 10^6$	Highly synthetic fertilizer
264	myn	$4.0287 \times 10^7$	$7.4423 \times 10^3$	$4.4038 \times 10^7$	Phosphatic manure
265	mt	$5.0444 \times 10^6$	$1.1132 \times 10^3$	$5.6055 \times 10^6$	Calcium cyanamide
266	myn	$3.5858 \times 10^7$	$6.2504 \times 10^3$	$3.9008 \times 10^7$	Other chemical manures
267	myn	$3.6000 \times 10^7$	$4.7861 \times 10^3$	$3.8412 \times 10^7$	Agricultural chemicals
268	mt	$6.2095 \times 10^6$	$8.7005 \times 10^2$	$6.6480 \times 10^6$	Carbon bisulfide
269	mt	$1.5215 \times 10^7$	$2.1319 \times 10^3$	$1.6290 \times 10^7$	Zinc oxide
270	mt	$2.2815 \times 10^7$	$3.1968 \times 10^3$	$2.4426 \times 10^7$	Titanium oxide
271	mt	$9.0232 \times 10^6$	$1.2643 \times 10^3$	$9.6604 \times 10^6$	Carbon black
272	myn	$5.4111 \times 10^7$	$7.5818 \times 10^3$	$5.7932 \times 10^7$	Other inorganic industrial chemicals
273	myn	$5.7292 \times 10^7$	$1.7755 \times 10^4$	$6.6241 \times 10^7$	High-pressure gas
274	myn	$2.4731 \times 10^7$	$4.6956 \times 10^3$	$2.7098 \times 10^7$	Synthetic dye
275	myn	$3.1025 \times 10^7$	$3.7676 \times 10^3$	$3.2924 \times 10^7$	Other basic industrial chemicals
276	myn	$5.0074 \times 10^7$	$5.0164 \times 10^3$	$5.2602 \times 10^7$	Paints, vanishes and lacquers
277	myn	$1.6874 \times 10^7$	$2.8748 \times 10^3$	$1.8323 \times 10^7$	Medicinal preparations
278	myn	$3.8012 \times 10^7$	$4.8919 \times 10^3$	$4.0477 \times 10^7$	Soap and surface active agents
279	myn	$2.3708 \times 10^7$	$4.0271 \times 10^3$	$2.5737 \times 10^7$	Toilet preparations and dentifrice
280	mt	$2.1082 \times 10^7$	$2.4899 \times 10^3$	$2.2337 \times 10^7$	Printing ink
281	myn	$1.3627 \times 10^7$	$3.3750 \times 10^3$	$1.5328 \times 10^7$	Match
282	myn	$2.7971 \times 10^7$	$3.4869 \times 10^3$	$2.9729 \times 10^7$	Powders
283	myn	$2.7971 \times 10^7$	$3.4869 \times 10^3$	$2.9729 \times 10^7$	Powders for other use
284	myn	$1.6525 \times 10^7$	$2.7548 \times 10^3$	$1.7913 \times 10^7$	Explosives
285	myn	$2.3808 \times 10^7$	$4.4964 \times 10^3$	$2.6074 \times 10^7$	Photographic sensitive materials
286	myn	$3.2457 \times 10^7$	$4.0384 \times 10^3$	$3.4493 \times 10^7$	Other final chemical products
287	kl	$9.5348 \times 10^6$	$1.9800 \times 10^2$	$9.6346 \times 10^6$	Gasoline
288	kl	$9.8674 \times 10^6$	$2.0490 \times 10^2$	$9.9707 \times 10^6$	Jet fuel oil
289	kl	$9.8674 \times 10^6$	$2.0490 \times 10^2$	$9.9707 \times 10^6$	Kerosene
290	kl	$1.0200 \times 10^7$	$2.1181 \times 10^2$	$1.0307 \times 10^7$	Light oil
291	kl	$1.0200 \times 10^7$	$2.1181 \times 10^2$	$1.0307 \times 10^7$	Heavy oil A
292	kl	$1.0865 \times 10^7$	$2.2562 \times 10^2$	$1.0979 \times 10^7$	Heavy oil B
293	kl	$1.0976 \times 10^7$	$2.2793 \times 10^2$	$1.1091 \times 10^7$	Heavy oil C
294	kl	$9.5348 \times 10^6$	$1.9800 \times 10^2$	$9.6346 \times 10^6$	Naphtha
295	mt	$1.3304 \times 10^7$	$2.7627 \times 10^2$	$1.3444 \times 10^7$	LPG(liquefied petroleum gas)
296	myn	$1.6506 \times 10^8$	$3.4275 \times 10^3$	$1.6678 \times 10^8$	Other petroleum refinery products
297	mt	$9.3077 \times 10^6$	$1.7466 \times 10^2$	$9.3957 \times 10^6$	Coke
298	myn	$2.4858 \times 10^8$	$4.6646 \times 10^3$	$2.5094 \times 10^8$	Other coal dry distillation products
299	mt	$5.4774 \times 10^6$	$1.5688 \times 10^2$	$5.5565 \times 10^6$	Briquette and briquette ball
300	myn	$5.5269 \times 10^7$	$2.2206 \times 10^3$	$5.6388 \times 10^7$	Paving materials

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
301	myn	$5.5269 \times 10^7$	$2.2206 \times 10^3$	$5.6388 \times 10^7$	Chemical processed wood
302	myn	$2.3386 \times 10^7$	$3.6906 \times 10^3$	$2.5246 \times 10^7$	Fire brick
303	myn	$2.3386 \times 10^7$	$3.6906 \times 10^3$	$2.5246 \times 10^7$	Other fire-cray goods
304	myn	$2.5846 \times 10^7$	$3.8606 \times 10^3$	$2.7792 \times 10^7$	Other structural clay products
305	myn	$3.2346 \times 10^7$	$4.2969 \times 10^3$	$3.4512 \times 10^7$	Sheet glass
306	myn	$2.5287 \times 10^7$	$4.2938 \times 10^3$	$2.7451 \times 10^7$	Other glass and glass products
307	myn	$1.8125 \times 10^7$	$3.2627 \times 10^3$	$1.9770 \times 10^7$	Pottery, china and earthenware for construction
308	myn	$1.8125 \times 10^7$	$3.2627 \times 10^3$	$1.9770 \times 10^7$	Pottery, china and earthenware for industry
309	myn	$1.8125 \times 10^7$	$3.2627 \times 10^3$	$1.9770 \times 10^7$	Pottery, china and earthenware for home use
310	mt	$1.3159 \times 10^6$	$1.9639 \times 10^2$	$1.4149 \times 10^6$	Cement
311	myn	$5.1149 \times 10^7$	$1.1904 \times 10^4$	$5.7149 \times 10^7$	Carbon products
312	myn	$1.9718 \times 10^7$	$4.0656 \times 10^3$	$2.1767 \times 10^7$	Abrasive
313	myn	$1.4431 \times 10^7$	$3.4952 \times 10^3$	$1.6193 \times 10^7$	Asbestos products
314	myn	$3.2280 \times 10^7$	$4.4427 \times 10^3$	$3.4520 \times 10^7$	Raw concrete
315	sm	$2.0432 \times 10^5$	$3.1229 \times 10^1$	$2.2006 \times 10^5$	Concrete panel
316	myn	$3.2625 \times 10^7$	$4.9863 \times 10^3$	$3.5138 \times 10^7$	Other cement products
317	myn	$2.3485 \times 10^7$	$4.8487 \times 10^3$	$2.5929 \times 10^7$	Other non-metallic mineral products
318	mt	$5.8813 \times 10^6$	$2.8219 \times 10^2$	$6.0235 \times 10^6$	Pig iron
319	myn	$5.1325 \times 10^7$	$7.5834 \times 10^3$	$5.5147 \times 10^7$	Iron scrap
320	mt	$1.7584 \times 10^7$	$7.2267 \times 10^3$	$2.1227 \times 10^7$	Ferro alloy
321	mt	$5.2758 \times 10^6$	$6.1461 \times 10^2$	$5.5855 \times 10^6$	Crude steel
322	mt	$6.5336 \times 10^6$	$7.8062 \times 10^2$	$6.9271 \times 10^6$	Hot rolled steel(ordinary steel)
323	myn	$8.3998 \times 10^7$	$1.0036 \times 10^4$	$8.9056 \times 10^7$	Hot rolled steel(special steel)
324	mt	$6.1155 \times 10^6$	$9.5893 \times 10^2$	$6.5988 \times 10^6$	Steel pipe and tube(ordinary steel)
325	mt	$2.8120 \times 10^7$	$4.4093 \times 10^3$	$3.0342 \times 10^7$	Steel pipe and tube(special steel)
326	mt	$6.2758 \times 10^6$	$7.6390 \times 10^2$	$6.6608 \times 10^6$	Cold-finished steel
327	mt	$7.0860 \times 10^6$	$8.6252 \times 10^2$	$7.5207 \times 10^6$	Coated steel
328	mt	$7.7895 \times 10^6$	$1.1846 \times 10^3$	$8.3865 \times 10^6$	Forged steel
329	mt	$1.2968 \times 10^7$	$2.1087 \times 10^3$	$1.4031 \times 10^7$	Cast steel
330	mt	$9.7217 \times 10^6$	$6.6463 \times 10^2$	$1.0057 \times 10^7$	Cast iron pipe and tube
331	myn	$4.5702 \times 10^7$	$4.7254 \times 10^3$	$4.8083 \times 10^7$	Cast steel for machinery
332	myn	$4.5702 \times 10^7$	$4.7254 \times 10^3$	$4.8083 \times 10^7$	Forged material for machinery
333	myn	$4.5100 \times 10^7$	$5.5012 \times 10^3$	$4.7872 \times 10^7$	Other steel products
334	mt	$9.9580 \times 10^6$	$2.6081 \times 10^3$	$1.1272 \times 10^7$	Electrolytic cathode copper
335	mt	$4.8251 \times 10^6$	$1.2321 \times 10^3$	$5.4460 \times 10^6$	Lead
336	mt	$4.4025 \times 10^6$	$1.1242 \times 10^3$	$4.9691 \times 10^6$	Regenerated lead
337	mt	$9.3874 \times 10^6$	$3.4618 \times 10^3$	$1.1132 \times 10^7$	Zinc
338	mt	$7.9527 \times 10^6$	$2.9327 \times 10^3$	$9.4308 \times 10^6$	Regenerated zinc
339	mt	$3.5667 \times 10^7$	$1.6559 \times 10^4$	$4.4013 \times 10^7$	Aluminium
340	mt	$2.4409 \times 10^7$	$1.1332 \times 10^4$	$3.0121 \times 10^7$	Regenerated aluminium
341	myn	$2.1165 \times 10^7$	$8.4847 \times 10^3$	$2.5442 \times 10^7$	Non-ferrous metal scraps
342	myn	$1.0193 \times 10^7$	$3.4062 \times 10^3$	$1.1910 \times 10^7$	Other non-ferrous metals
343	mt	$1.2277 \times 10^7$	$4.0925 \times 10^3$	$1.4340 \times 10^7$	Rolled, drawn and extruded copper
344	mt	$5.1180 \times 10^7$	$2.3028 \times 10^4$	$6.2786 \times 10^7$	Rolled aluminium
345	myn	$3.9041 \times 10^7$	$1.3218 \times 10^4$	$4.5703 \times 10^7$	Cast and forged materials for machinery(non-ferrous)
346	myn	$1.2083 \times 10^7$	$4.3314 \times 10^3$	$1.4266 \times 10^7$	Other basic non-ferrous metal products
347	myn	$2.8292 \times 10^7$	$3.7797 \times 10^3$	$3.0197 \times 10^7$	Panel for steel-frame structure
348	myn	$3.6712 \times 10^7$	$4.9349 \times 10^3$	$3.9199 \times 10^7$	Other structural metal products
349	myn	$3.5993 \times 10^7$	$9.7197 \times 10^3$	$4.0892 \times 10^7$	Metal door and shutter
350	myn	$3.0441 \times 10^7$	$5.4829 \times 10^3$	$3.3204 \times 10^7$	Metal products for construction

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
351	myn	$3.0441 \times 10^7$	$5.4829 \times 10^3$	$3.3204 \times 10^7$	Other metal products for construction
352	myn	$2.7843 \times 10^7$	$6.6438 \times 10^3$	$3.1191 \times 10^7$	Metal products for home use
353	myn	$3.3661 \times 10^7$	$3.7523 \times 10^3$	$3.5552 \times 10^7$	Metal tool
354	myn	$3.0547 \times 10^7$	$5.6792 \times 10^3$	$3.3409 \times 10^7$	Other metal products
355	myn	$1.5416 \times 10^7$	$2.8657 \times 10^3$	$1.6861 \times 10^7$	Prime mover and boiler
356	myn	$1.4293 \times 10^7$	$2.7673 \times 10^3$	$1.5688 \times 10^7$	Machine tool
357	myn	$1.9698 \times 10^7$	$3.2799 \times 10^3$	$2.1351 \times 10^7$	Metalworking machinery
358	myn	$1.3828 \times 10^7$	$2.8513 \times 10^3$	$1.5266 \times 10^7$	Agricultural machinery
359	myn	$1.8420 \times 10^7$	$3.3558 \times 10^3$	$2.0111 \times 10^7$	Mining and construction machinery
360	myn	$2.1296 \times 10^7$	$3.3010 \times 10^3$	$2.2960 \times 10^7$	Chemical machinery
361	myn	$1.8724 \times 10^7$	$3.1329 \times 10^3$	$2.0303 \times 10^7$	Textile machinery
362	myn	$1.8357 \times 10^7$	$2.8819 \times 10^3$	$1.9809 \times 10^7$	Food processing machinery
363	myn	$1.8562 \times 10^7$	$2.7789 \times 10^3$	$1.9963 \times 10^7$	Wood processing machinery
364	myn	$1.6428 \times 10^7$	$3.0805 \times 10^3$	$1.7981 \times 10^7$	Pulp equipment and paper machinery
365	myn	$1.9769 \times 10^7$	$3.0008 \times 10^3$	$2.1281 \times 10^7$	Printing, bookbinding and paper-processing machinery
366	myn	$2.0780 \times 10^7$	$3.1013 \times 10^3$	$2.2343 \times 10^7$	Cast equipment
367	myn	$2.0780 \times 10^7$	$3.1013 \times 10^3$	$2.2343 \times 10^7$	Plastic processing machinery
368	myn	$2.0780 \times 10^7$	$3.1013 \times 10^3$	$2.2343 \times 10^7$	Other special industrial machinery
369	myn	$1.6742 \times 10^7$	$3.0160 \times 10^3$	$1.8262 \times 10^7$	Pump and compressor
370	myn	$2.0009 \times 10^7$	$3.1756 \times 10^3$	$2.1610 \times 10^7$	Conveyor
371	myn	$1.9202 \times 10^7$	$3.0641 \times 10^3$	$2.0747 \times 10^7$	Refrigerating machinery and equipment
372	myn	$1.9202 \times 10^7$	$3.0641 \times 10^3$	$2.0747 \times 10^7$	Air conditioning equipment
373	myn	$2.3045 \times 10^7$	$3.5917 \times 10^3$	$2.4855 \times 10^7$	Machinery for service industry
374	myn	$2.3045 \times 10^7$	$3.5917 \times 10^3$	$2.4855 \times 10^7$	Automatic vending machinery
375	myn	$2.3045 \times 10^7$	$3.5917 \times 10^3$	$2.4855 \times 10^7$	Amusement machinery
376	myn	$1.9172 \times 10^7$	$2.8230 \times 10^3$	$2.0595 \times 10^7$	Railway cars for industrial use
377	myn	$2.3209 \times 10^7$	$3.3636 \times 10^3$	$2.4904 \times 10^7$	Industrial furnace
378	myn	$1.9009 \times 10^7$	$3.2537 \times 10^3$	$2.0649 \times 10^7$	Other general industrial machineries and equipments
379	myn	$9.3403 \times 10^6$	$1.7175 \times 10^3$	$1.0206 \times 10^7$	General machinery repair
380	myn	$1.6595 \times 10^7$	$3.2031 \times 10^3$	$1.8209 \times 10^7$	Office machinery
381	myn	$1.2680 \times 10^7$	$2.6022 \times 10^3$	$1.3992 \times 10^7$	Sewing machine and wool knitting machinery
382	myn	$1.1888 \times 10^7$	$2.4691 \times 10^3$	$1.3133 \times 10^7$	Firearms
383	myn	$2.1620 \times 10^7$	$3.4521 \times 10^3$	$2.3360 \times 10^7$	Other machinery and their parts
384	myn	$2.2499 \times 10^7$	$3.8991 \times 10^3$	$2.4464 \times 10^7$	Generator
385	myn	$2.2105 \times 10^7$	$3.7037 \times 10^3$	$2.3972 \times 10^7$	Transmission and distribution apparatus
386	myn	$2.0549 \times 10^7$	$3.6099 \times 10^3$	$2.2368 \times 10^7$	Electric motor
387	myn	$1.9305 \times 10^7$	$3.4179 \times 10^3$	$2.1028 \times 10^7$	Other industrial strong electrical machinery
388	myn	$1.9423 \times 10^7$	$3.9496 \times 10^3$	$2.1414 \times 10^7$	Electric bulb
389	myn	$1.5214 \times 10^7$	$2.9881 \times 10^3$	$1.6720 \times 10^7$	Electric sounder
390	myn	$1.3726 \times 10^7$	$2.8992 \times 10^3$	$1.5187 \times 10^7$	Radio and television set
391	myn	$1.5107 \times 10^7$	$2.9787 \times 10^3$	$1.6609 \times 10^7$	Electric equipment for home use
392	myn	$1.7811 \times 10^7$	$4.1399 \times 10^3$	$1.9898 \times 10^7$	Electronic computer and accessory device
393	myn	$1.8234 \times 10^7$	$3.4335 \times 10^3$	$1.9964 \times 10^7$	Other weak electrical appliances
394	myn	$1.4359 \times 10^7$	$3.0509 \times 10^3$	$1.5897 \times 10^7$	Other applied electronic equipments
395	myn	$1.7471 \times 10^7$	$4.7144 \times 10^3$	$1.9847 \times 10^7$	Electronic tube
396	myn	$2.2353 \times 10^7$	$5.5154 \times 10^3$	$2.5132 \times 10^7$	Semi-conductor device and integrated circuit
397	myn	$1.4880 \times 10^7$	$3.4638 \times 10^3$	$1.6626 \times 10^7$	Telecommunication machinery and related equipment
398	myn	$1.3852 \times 10^7$	$2.9287 \times 10^3$	$1.5328 \times 10^7$	Electric measuring instrument
399	myn	$2.4181 \times 10^7$	$4.9080 \times 10^3$	$2.6654 \times 10^7$	Electric illuminator
400	myn	$1.1396 \times 10^7$	$2.5900 \times 10^3$	$1.2702 \times 10^7$	Repair of electric machinery

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
401	mt	$2.5227 \times 10^7$	$6.2782 \times 10^3$	$2.8391 \times 10^7$	Copper electric wire and cable
402	mt	$1.3814 \times 10^7$	$3.4378 \times 10^3$	$1.5547 \times 10^7$	Aluminium electric wire and cable
403	myn	$2.0244 \times 10^7$	$2.9732 \times 10^3$	$2.1743 \times 10^7$	Steel ship
404	myn	$1.9347 \times 10^7$	$2.6292 \times 10^3$	$2.0672 \times 10^7$	Other ships
405	myn	$2.0072 \times 10^7$	$3.2921 \times 10^3$	$2.1731 \times 10^7$	Repair of ship
406	myn	$2.3821 \times 10^7$	$4.1236 \times 10^3$	$2.5899 \times 10^7$	Railway car
407	myn	$2.0600 \times 10^7$	$3.9547 \times 10^3$	$2.2593 \times 10^7$	Railway car for industrial use
408	myn	$2.0777 \times 10^7$	$3.1334 \times 10^3$	$2.2356 \times 10^7$	Repair railway car
409	myn	$1.7963 \times 10^7$	$3.4216 \times 10^3$	$1.9688 \times 10^7$	Passenger car
410	myn	$1.7963 \times 10^7$	$3.4216 \times 10^3$	$1.9688 \times 10^7$	Other motor vehicles
411	myn	$1.2525 \times 10^7$	$2.1852 \times 10^3$	$1.3627 \times 10^7$	Repair of motor vehicle
412	myn	$1.6602 \times 10^7$	$3.3898 \times 10^3$	$1.8310 \times 10^7$	Two wheels motor vehicle
413	myn	$2.2672 \times 10^7$	$3.7000 \times 10^3$	$2.4537 \times 10^7$	Bicycle and rear car
414	myn	$2.5314 \times 10^7$	$6.2873 \times 10^3$	$2.8483 \times 10^7$	Aircraft
415	myn	$1.5425 \times 10^7$	$3.9104 \times 10^3$	$1.7396 \times 10^7$	Repair of aircraft
416	myn	$1.6545 \times 10^7$	$2.6933 \times 10^3$	$1.7903 \times 10^7$	Other transport machinery
417	myn	$1.0857 \times 10^7$	$2.3120 \times 10^3$	$1.2022 \times 10^7$	Repair other transport machinery
418	myn	$1.5925 \times 10^7$	$2.8734 \times 10^3$	$1.7373 \times 10^7$	Physical and chemical instrument
419	myn	$1.8083 \times 10^7$	$3.3589 \times 10^3$	$1.9776 \times 10^7$	Instrument for weight and measure
420	myn	$1.1894 \times 10^7$	$1.9051 \times 10^3$	$1.2854 \times 10^7$	Medical instrument
421	myn	$9.5840 \times 10^6$	$1.9552 \times 10^3$	$1.0569 \times 10^7$	Repair of precision instrument
422	myn	$1.1080 \times 10^7$	$3.3575 \times 10^3$	$1.2772 \times 10^7$	Camera
423	myn	$1.4160 \times 10^7$	$3.6416 \times 10^3$	$1.5995 \times 10^7$	Other photographic and optical instruments
424	myn	$1.1898 \times 10^7$	$2.3342 \times 10^3$	$1.3075 \times 10^7$	Watch and clock
425	myn	$8.3570 \times 10^6$	$1.9466 \times 10^3$	$9.3381 \times 10^6$	Repair of watch and clock
426	myn	$1.6608 \times 10^7$	$3.2398 \times 10^3$	$1.8241 \times 10^7$	Toy and athletic goods(except rubber made)
427	myn	$1.0942 \times 10^7$	$1.6814 \times 10^3$	$1.1789 \times 10^7$	Musical instrument
428	myn	$3.6974 \times 10^7$	$3.9567 \times 10^3$	$3.8968 \times 10^7$	Plastic products
429	myn	$1.6135 \times 10^7$	$3.5667 \times 10^3$	$1.7933 \times 10^7$	Writing instrument
430	myn	$1.2435 \times 10^7$	$2.6049 \times 10^3$	$1.3748 \times 10^7$	Small personal adornment
431	myn	$2.1808 \times 10^7$	$3.6488 \times 10^3$	$2.3647 \times 10^7$	Other industrial products
432	myn	$1.4347 \times 10^7$	$2.2829 \times 10^3$	$1.5498 \times 10^7$	New residential building construction(wooden)
433	myn	$1.8714 \times 10^7$	$2.9699 \times 10^3$	$2.0210 \times 10^7$	New residential building construction(non-wooden)
434	myn	$1.3621 \times 10^7$	$2.0103 \times 10^3$	$1.4634 \times 10^7$	New non-residential building construction(wooden)
435	myn	$1.8494 \times 10^7$	$3.0501 \times 10^3$	$2.0032 \times 10^7$	New non-residential building construction(non-wooden)
436	myn	$1.7266 \times 10^7$	$2.7810 \times 10^3$	$1.8668 \times 10^7$	Repair of building
437	myn	$1.8357 \times 10^7$	$2.6008 \times 10^3$	$1.9668 \times 10^7$	Public utility construction of road
438	myn	$1.8005 \times 10^7$	$2.6380 \times 10^3$	$1.9335 \times 10^7$	Public utility construction of river, drainage and others
439	myn	$1.4387 \times 10^7$	$2.0493 \times 10^3$	$1.5420 \times 10^7$	Public utility construction
440	myn	$1.8578 \times 10^7$	$2.9662 \times 10^3$	$2.0073 \times 10^7$	Railway construction
441	myn	$2.2712 \times 10^7$	$3.1315 \times 10^3$	$2.4290 \times 10^7$	Electric facilities construction
442	myn	$1.5055 \times 10^7$	$2.6728 \times 10^3$	$1.6402 \times 10^7$	Telegraph and telephone facilities construction
443	myn	$1.5733 \times 10^7$	$2.2888 \times 10^3$	$1.6887 \times 10^7$	Other constructions
444	mkw	$2.0367 \times 10^9$	$1.0443 \times 10^6$	$2.5630 \times 10^9$	Electric power
445	mkw	$1.8251 \times 10^9$	$1.0388 \times 10^6$	$2.3487 \times 10^9$	Private power plant
446	kcm	$1.2846 \times 10^7$	$4.5089 \times 10^2$	$1.3073 \times 10^7$	Gas supply
447	gcl	$1.9557 \times 10^6$	$1.2126 \times 10^2$	$2.0168 \times 10^6$	Steam and hot water supply
448	myn	$1.3127 \times 10^7$	$5.6181 \times 10^3$	$1.5958 \times 10^7$	Water supply
449	kcm	$2.8374 \times 10^5$	$1.1921 \times 10^2$	$3.4383 \times 10^5$	Industrial water supply
450	myn	$2.7361 \times 10^7$	$5.9522 \times 10^3$	$3.0361 \times 10^7$	Sewage disposal

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
451	myn	$1.0129 \times 10^7$	$9.5240 \times 10^2$	$1.0609 \times 10^7$	Other sanitary services(governmental)
452	myn	$5.8199 \times 10^6$	$4.3031 \times 10^2$	$6.0368 \times 10^6$	Other sanitary services(industrial)
453	myn	$4.7089 \times 10^6$	$9.7468 \times 10^2$	$5.2002 \times 10^6$	Wholesale trade
454	myn	$8.3051 \times 10^6$	$1.3872 \times 10^3$	$9.0042 \times 10^6$	Retail trade
455	myn	$3.5022 \times 10^6$	$7.9759 \times 10^2$	$3.9041 \times 10^6$	Financial service(imputed interest) public
456	myn	$3.5022 \times 10^6$	$7.9759 \times 10^2$	$3.9041 \times 10^6$	Financial service(imputed interest) private
457	myn	$3.5022 \times 10^6$	$7.9759 \times 10^2$	$3.9041 \times 10^6$	Financial service(commission) public
458	myn	$3.5022 \times 10^6$	$7.9759 \times 10^2$	$3.9041 \times 10^6$	Financial service(commission) private
459	myn	$2.1392 \times 10^6$	$6.9591 \times 10^2$	$2.4900 \times 10^6$	Life insurance(insurance service)
460	myn	$2.9795 \times 10^6$	$5.5596 \times 10^2$	$3.2598 \times 10^6$	Casualty insurance(insurance service)
461	myn	$5.8091 \times 10^6$	$1.4323 \times 10^3$	$6.5310 \times 10^6$	Real estate agency
462	myn	$1.2868 \times 10^6$	$2.0512 \times 10^2$	$1.3902 \times 10^6$	House rent
463	myn	$8.2956 \times 10^6$	$1.4477 \times 10^3$	$9.0252 \times 10^6$	Real estate rent
464	myn	$1.6094 \times 10^7$	$4.7400 \times 10^3$	$1.8483 \times 10^7$	National railway transport(passenger)
465	myn	$1.6094 \times 10^7$	$4.7400 \times 10^3$	$1.8483 \times 10^7$	National railway transport(freight)
466	myn	$1.1665 \times 10^7$	$4.7528 \times 10^3$	$1.4060 \times 10^7$	Passenger of national railway electric train
467	myn	$1.2971 \times 10^7$	$4.9230 \times 10^3$	$1.5452 \times 10^7$	Local railway and tramway transport(passenger)
468	myn	$1.2971 \times 10^7$	$4.9230 \times 10^3$	$1.5452 \times 10^7$	Local railway and tramway transport(freight)
469	myn	$1.0485 \times 10^7$	$6.5061 \times 10^2$	$1.0813 \times 10^7$	Bus
470	myn	$1.5195 \times 10^7$	$7.0071 \times 10^2$	$1.5548 \times 10^7$	Taxi
471	myn	$3.5960 \times 10^7$	$1.6749 \times 10^3$	$3.6804 \times 10^7$	Passenger transport by private motor car
472	myn	$1.2844 \times 10^7$	$7.1339 \times 10^2$	$1.3203 \times 10^7$	Road freight transport
473	myn	$9.4889 \times 10^6$	$7.9556 \times 10^2$	$9.8899 \times 10^6$	Railway forwarding
474	myn	$4.6022 \times 10^7$	$1.8432 \times 10^3$	$4.6951 \times 10^7$	Freight transport by private motor car
475	myn	$4.5994 \times 10^6$	$1.9432 \times 10^3$	$5.5788 \times 10^6$	Road transport facility service
476	myn	$4.8259 \times 10^7$	$1.5155 \times 10^3$	$4.9023 \times 10^7$	Ocean transport
477	myn	$5.7291 \times 10^7$	$1.8895 \times 10^3$	$5.8243 \times 10^7$	Coastal and inland water transport(passenger)
478	myn	$5.7291 \times 10^7$	$1.8895 \times 10^3$	$5.8243 \times 10^7$	Coastal and inland water transport(freight)
479	myn	$6.3393 \times 10^6$	$7.7007 \times 10^2$	$6.7274 \times 10^6$	Transport service in harbor
480	myn	$5.7485 \times 10^6$	$7.6361 \times 10^2$	$6.1333 \times 10^6$	Services relating to water transport
481	myn	$2.6672 \times 10^7$	$1.6663 \times 10^3$	$2.7512 \times 10^7$	International air transport
482	myn	$2.6672 \times 10^7$	$1.6663 \times 10^3$	$2.7512 \times 10^7$	Domestic air transport(passenger)
483	myn	$2.6672 \times 10^7$	$1.6663 \times 10^3$	$2.7512 \times 10^7$	Domestic air transport(freight)
484	myn	$2.6672 \times 10^7$	$1.6663 \times 10^3$	$2.7512 \times 10^7$	Aircraft use business
485	myn	$1.3164 \times 10^7$	$5.0713 \times 10^3$	$1.5720 \times 10^7$	Services relating to air transport
486	myn	$7.0049 \times 10^6$	$1.5169 \times 10^3$	$7.7695 \times 10^6$	Other transport services
487	myn	$7.6973 \times 10^6$	$2.0889 \times 10^3$	$8.7502 \times 10^6$	Storage facility service
488	myn	$3.3134 \times 10^7$	$1.4717 \times 10^4$	$4.0551 \times 10^7$	Private storage facility
489	myn	$3.6519 \times 10^6$	$4.7155 \times 10^2$	$3.8895 \times 10^6$	Postal service
490	myn	$2.8305 \times 10^6$	$6.4406 \times 10^2$	$3.1551 \times 10^6$	Domestic telegraph and telephone service
491	myn	$5.8705 \times 10^6$	$1.5793 \times 10^3$	$6.6665 \times 10^6$	International telegraph and telephone service
492	myn	$3.4931 \times 10^6$	$8.0167 \times 10^2$	$3.8971 \times 10^6$	Services relating to communication
493	myn	$7.5509 \times 10^6$	$9.8912 \times 10^2$	$8.0494 \times 10^6$	Public administration(central)
494	myn	$5.0667 \times 10^6$	$7.5810 \times 10^2$	$5.4488 \times 10^6$	Public administration(local)
495	myn	$2.6201 \times 10^6$	$7.5473 \times 10^2$	$3.0005 \times 10^6$	School education(public)
496	myn	$4.9735 \times 10^6$	$1.1879 \times 10^3$	$5.5723 \times 10^6$	School education(private)
497	myn	$5.9062 \times 10^6$	$1.2183 \times 10^3$	$6.5202 \times 10^6$	School research institute(public,natural)
498	myn	$3.5896 \times 10^6$	$6.2040 \times 10^2$	$3.9023 \times 10^6$	School research institute(public,cultural)
499	myn	$5.5971 \times 10^6$	$1.3352 \times 10^3$	$6.2700 \times 10^6$	School research institute(private,natural)
500	myn	$2.3827 \times 10^6$	$4.3656 \times 10^2$	$2.6027 \times 10^6$	School research institute(private,cultural)

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
501	myn	$1.7967 \times 10^7$	$3.1572 \times 10^3$	$1.9559 \times 10^7$	Privately conducted education
502	myn	$1.5537 \times 10^7$	$4.2891 \times 10^3$	$1.7699 \times 10^7$	Social education(public)
503	myn	$8.7763 \times 10^6$	$2.4621 \times 10^3$	$1.0017 \times 10^7$	Social education(non-profit)
504	myn	$2.3198 \times 10^7$	$6.1458 \times 10^3$	$2.6295 \times 10^7$	Other educations(public)
505	myn	$2.2512 \times 10^7$	$1.6060 \times 10^3$	$2.3322 \times 10^7$	Other educations(industrial)
506	myn	$5.1577 \times 10^6$	$1.5546 \times 10^3$	$5.9413 \times 10^6$	Research institute(public,natural)
507	myn	$3.7096 \times 10^6$	$7.3527 \times 10^2$	$4.0802 \times 10^6$	Research institute(public,cultural)
508	myn	$8.2381 \times 10^6$	$2.0850 \times 10^3$	$9.2890 \times 10^6$	Research institute(industrial,natural)
509	myn	$4.3959 \times 10^6$	$1.0569 \times 10^3$	$4.9286 \times 10^6$	Research institute(industrial,cultural)
510	myn	$2.5616 \times 10^7$	$8.8443 \times 10^3$	$3.0074 \times 10^7$	Privately conducted research
511	myn	$8.9379 \times 10^6$	$1.5678 \times 10^3$	$9.7281 \times 10^6$	Medical service(public)
512	myn	$9.4050 \times 10^6$	$1.5076 \times 10^3$	$1.0165 \times 10^7$	Medical service(private,non-profit)
513	myn	$1.0866 \times 10^7$	$1.9165 \times 10^3$	$1.1832 \times 10^7$	Medical service(industrial)
514	myn	$5.1296 \times 10^6$	$1.0877 \times 10^3$	$5.6779 \times 10^6$	Health and hygiene(public)
515	myn	$7.4276 \times 10^6$	$1.4972 \times 10^3$	$8.1822 \times 10^6$	Health and hygiene(private,non-profit)
516	myn	$5.3515 \times 10^6$	$8.8506 \times 10^2$	$5.7976 \times 10^6$	Health and hygiene(industrial)
517	myn	$1.0665 \times 10^7$	$3.1638 \times 10^3$	$1.2260 \times 10^7$	Social insurance
518	myn	$6.1797 \times 10^6$	$1.1086 \times 10^3$	$6.7385 \times 10^6$	Social welfare facility(public)
519	myn	$5.6446 \times 10^6$	$1.0186 \times 10^3$	$6.1580 \times 10^6$	Social welfare facility(private,non-profit)
520	myn	$6.3636 \times 10^6$	$1.1351 \times 10^3$	$6.9356 \times 10^6$	Private non-profit institute to enterprise
521	myn	$5.7397 \times 10^6$	$8.9106 \times 10^2$	$6.1888 \times 10^6$	Private non-profit institute to household
522	myn	$8.7870 \times 10^6$	$1.8900 \times 10^3$	$9.7396 \times 10^6$	Advertising agency
523	myn	$5.3834 \times 10^6$	$1.0202 \times 10^3$	$5.8976 \times 10^6$	Research,data processing and calculation service
524	myn	$4.5156 \times 10^6$	$6.6453 \times 10^2$	$4.8505 \times 10^6$	Information service
525	myn	$5.3284 \times 10^6$	$6.9515 \times 10^2$	$5.6788 \times 10^6$	Structural service
526	myn	$4.6703 \times 10^6$	$8.8059 \times 10^2$	$5.1141 \times 10^6$	Judicial, financial and account service
527	myn	$7.2433 \times 10^6$	$1.3129 \times 10^3$	$7.9050 \times 10^6$	Civil engineering and construction service
528	myn	$8.7029 \times 10^6$	$1.2585 \times 10^3$	$9.3372 \times 10^6$	Other business services
529	myn	$4.6388 \times 10^6$	$7.1266 \times 10^2$	$4.9980 \times 10^6$	Rental and leasing of electronic computer, accessory device
530	myn	$7.8503 \times 10^6$	$1.2072 \times 10^3$	$8.4588 \times 10^6$	Rental and leasing of business goods
531	myn	$5.2114 \times 10^6$	$7.2507 \times 10^2$	$5.5769 \times 10^6$	Car renting
532	myn	$1.0629 \times 10^7$	$1.3637 \times 10^3$	$1.1317 \times 10^7$	Motion picture production and supply
533	myn	$1.0710 \times 10^7$	$2.7649 \times 10^3$	$1.2103 \times 10^7$	Movie theater
534	myn	$8.4843 \times 10^6$	$2.1378 \times 10^3$	$9.5618 \times 10^6$	Theater and entertainment facility
535	myn	$1.1907 \times 10^7$	$3.3971 \times 10^3$	$1.3619 \times 10^7$	Amusement hall
536	myn	$7.3982 \times 10^6$	$1.3423 \times 10^3$	$8.0747 \times 10^6$	Other amusement and recreation facilities
537	myn	$8.3003 \times 10^6$	$7.9761 \times 10^2$	$8.7023 \times 10^6$	Company for entertainment
538	myn	$8.1791 \times 10^6$	$8.1826 \times 10^2$	$8.5916 \times 10^6$	Other amusement and recreation services
539	myn	$5.8204 \times 10^6$	$1.0358 \times 10^3$	$6.3425 \times 10^6$	Public broadcasting
540	myn	$5.8204 \times 10^6$	$1.0358 \times 10^3$	$6.3425 \times 10^6$	Private broadcasting
541	myn	$4.9123 \times 10^6$	$9.1268 \times 10^2$	$5.3723 \times 10^6$	Amusement drinking and eating place
542	myn	$1.3572 \times 10^7$	$2.5142 \times 10^3$	$1.4840 \times 10^7$	Other drinking and eating places
543	myn	$1.1059 \times 10^7$	$2.4065 \times 10^3$	$1.2272 \times 10^7$	Hotel and other lodging places
544	myn	$1.2636 \times 10^7$	$2.1459 \times 10^3$	$1.3717 \times 10^7$	Cleaning, laundries and dyeing service
545	myn	$7.0742 \times 10^6$	$2.1109 \times 10^3$	$8.1381 \times 10^6$	Barber shop
546	myn	$7.2296 \times 10^6$	$1.8879 \times 10^3$	$8.1811 \times 10^6$	Beauty shop
547	myn	$7.4832 \times 10^6$	$2.2540 \times 10^3$	$8.6192 \times 10^6$	Public bath
548	myn	$9.1348 \times 10^6$	$1.1174 \times 10^3$	$9.6980 \times 10^6$	Photo studio
549	myn	$7.2901 \times 10^6$	$8.2384 \times 10^2$	$7.7053 \times 10^6$	Funeral service
550	myn	$1.0978 \times 10^7$	$2.0617 \times 10^3$	$1.2018 \times 10^7$	Miscellaneous repairs,n.e.c.

(to be continued)

Table A. (continued)

No.	Unit	Thermal (kcal)	Electric (kwh)	Total (kcal)	Sector name
551	myn	$5.8006 \times 10^6$	$1.2254 \times 10^3$	$6.4182 \times 10^6$	Other personal services
552	myn	$1.3989 \times 10^7$	$3.2001 \times 10^3$	$1.5601 \times 10^7$	Office supplies
553	myn	$1.6178 \times 10^7$	$3.9038 \times 10^3$	$1.8145 \times 10^7$	Packing materials
554	myn	$3.0643 \times 10^7$	$3.9695 \times 10^3$	$3.2644 \times 10^7$	Activities not adequately classified

## Appendix B

### 核融合炉のエネルギー分析のためのE Iデータベース

#### B-1. エネルギー・インテンシティーの算出にあたって

エネルギー分析には、わが国の産業構造や生産技術に基づいた、わが国のE Iデータベースが必要である。材料のE Iの算出のために産業連関分析とプロセス分析とを併用することにして、一般的な素材は産業連関分析から、また、統計上産業連関表に一つの部門として記載されない材料や核融合炉に特有な材料はプロセス分析から求める。商業用核融合炉の実現が、例えば、2000年以降であるとする、その時点におけるE Iが必要であるが、その推定は不可能であるので現在の技術水準をもとにE Iを算出するはかない。

産業連関分析では、日本の1980年産業連関表をもとにE Iを算出した。Nagai (1984) による1965、1970、1975、1980年の産業連関表を用いたE Iの時系列の分析によれば、いわゆる石油ショック以後の1975年から1980年にかけてのE Iの変化は小さく、1980年のE Iを外挿して使用することは可能であると思われる（もちろん、データベースの更新は重要であるが）。プロセス分析では、メーカーにおいて製品の製造過程で投入される原材料と消費エネルギーを調査した。製品のE Iを算出するにはその原材料のE Iを知る必要があるが、一般的な素材は産業連関分析から求め、産業連関表に単独で分類されない素材や核融合炉に特有な素材（ニオブ、ベリリウムなど）のE Iは他の文献から引用した。

E Iの算出にあたって、その計量化の範囲が必ずしも明確でないため、精度を議論することが難しいのがエネルギー分析の欠点である。

#### B-2. 素材のエネルギー・インテンシティー

素材と材料の区別は必ずしも明瞭ではないが、一応他の材料の原料となるものを素材と考えることにする。ただし、素材がそのまま核融合炉材料として使用される場合もあり得る（タングステン、ベリリウムなど）。表B-1に主な素材のE Iを示す。

#### B-3. 核融合炉材料のエネルギー・インテンシティー

核融合炉材料として重要なステンレス鋼などの構造材および超電導線材については、メーカーに対して調査を行ない、プロセス分析によりE Iを算出した。神戸製鋼所（太田・青田、1983）において調査した特殊合金の組成と求めたE Iをそれぞれ表B-2、B-3に示す。Zr<sub>5</sub>Pb<sub>3</sub>のE Iは表B-1中の鉛のE Iと等しいと仮定して $5.45 \times 10^6$  kcal/tとした。また、TiH<sub>2</sub>はチタンスポンジに水素を反応させて製造するが、表B-1中

のチタンのE Iから、分子量の比で換算して $2.04 \times 10^8$  kcal/tとした。リチウムに関しては第二章で議論されている。

表B-1. 核融合炉材料の主な素材のE I

素材	E I ( $10^6$ kcal/t)	出典	備考
粗鋼	5.59	(1)	
銅(電気)	11.3	(1)	
鉛	5.45	(1)	
亜鉛	11.1	(1)	
アルミニウム	44.0	(1)	
タングステン	74.5	(2)	
ニッケル	14.9	(3)	
チタン	213	(4)	
モリブデン	180	(5)	MoS <sub>2</sub> から。
ニオブ	693	(5)	パクロイア鉱石(Nb 0.5%)から。
ベリリウム	860	(5)	
MoO <sub>3</sub>	51	(5)	ばい焼鉱(MoO <sub>3</sub> 90%)。
グラファイト	50	(5)	原子力級。
B <sub>4</sub> C	50	(5)	グラファイトと同じと想定。
ヘリウム	50	(5)	天然ガスから採取。
重水素	$2.16 \times 10^4$	(6)	水-硫化水素二重温度交換法による。

- 1) 1980年産業連関表に基づく産業連関分析から(Appendix A参照)。
- 2) 産業連関分析による「その他の非鉄金属地金部門」のE I ( $1.19 \times 10^7$  kcal/ $10^6$ 円)と1980年工業統計表のタングステンの価格( $6.26 \times 10^6$ 円/t)から換算した。
- 3) 科学技術庁資源調査会(1982)。
- 4) 茅・鈴木(1982)。
- 5) 未来工学研究所(1978)。
- 6) 新しく調査。

表B-2. ステンレス鋼等特殊合金の組成  
単位は重量百分率。

	PCA	SUS304	SUS316	Inconel 718	Fe1422	Ti 64
C	0.05	0.05	0.05	0.05	0.5	<0.08
Si	0.5	0.5	0.5	<0.5	<0.5	-
Mn	1.8	1.8	1.8	<1.0	14	-
P	0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	-
S	<0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	-
Ni	16	12	12	53	2	-
Cr	15	18	18	19	2	-
Mo	2.5	-	2.5	3	-	-
Ti	0.25	-	-	1	-	bal
Al	-	-	-	0.5	-	5.50~6.75
Nb	-	-	-	5	-	-
B	0.003	-	-	-	-	-
N	-	-	-	-	0.02	<0.05
V	-	-	-	-	-	3.50~4.50
O	-	-	-	-	-	<0.20
H	-	-	-	-	-	<0.0150
Fe	bal	bal	bal	18	bal	<0.30

表B-3. ステンレス鋼等特殊合金のEI<sup>a</sup>

材料	10 <sup>6</sup> kcal/t
PCA	40.5
SUS304	31.3
SUS316	32.1
Inconel718	93.8
Fe1422	9.9 <sup>b</sup>
Ti64	299

<sup>a</sup>原料としては鋼スラップ、Fe-Ni、Fe-Cr、Fe-Si、Fe-Nb、MoO<sub>3</sub>、金属ニッケル、金属鉛、チタンなど。

<sup>b</sup>MnのEI未詳のため精度は低い。

表B-4. 超電導線材のEI

	歩留り (%)	線材のEI (10 <sup>6</sup> kcal/t)	NbTi、Nb <sub>3</sub> Sn 1 t 当たりのEI (10 <sup>6</sup> kcal/t)
PFコイル用NbTi線(NbTi7%、Cu93%)	85	568	8.11×10 <sup>3</sup>
TFコイル用NbTi線(NbTi50%、Cu50%)	85	831	1.66×10 <sup>3</sup>
Nb <sub>3</sub> Sn線(Nb <sub>3</sub> Sn16.7%、Cu83.3%)	70	1180	7.07×10 <sup>3</sup>

超電導線材は三菱電機相模製作所(橋本他、1983)において調査した。製造工程および投入エネルギーの詳細は非公開であるため、結果のみ表B-4に示す。NbTi、Nb<sub>3</sub>Snはともに径が数μmの極細多芯ツイスト線である。表B-4中の歩留りは、製造技術の進歩を考慮して想定してある。

#### B-4. 炉設備製造に要するエネルギー

現在ある大型実験炉としては、日本では日本原子力研究所のJT-60(トカマク型)があるが、これの製造に要したエネルギーは不明である。また、JT-60の製造エネルギーを知ることができたとしても、それをそのまま商業用核融合炉に適用できるかは疑問である。従って、ここでは既にある機器の製造エネルギーから炉設備の製造エネルギーを推定することにする。

##### (1)材料エネルギーと製造エネルギーとの比率

1980年産業連関表(554部門)の機器部門(61部門)のEIの値の内訳をみると、5.0~45.2%がエネルギー部門からの投入エネルギーによって占められている。エネルギー部門からの投入をその機器部門の製造エネルギーとみるならば、エネルギー部門からの投入の割合が最も大きい航空機部門のEI(28.48×10<sup>6</sup>kcal/100万円)の内訳は、材料エネルギー47.5%、製造エネルギー45.2%、その他7.3%となっている。従って、航空機の製造エネルギーは材料エネルギーの0.951倍となる。

## (2)航空機の製造エネルギー

1980年の航空機部門の生産機数とエネルギー消費量の関係から、単位重量当たりの製造エネルギーを推定すると $1.51 \times 10^8$  kcal/tとなる。

## (3)原子炉压力容器の製造エネルギー

核融合炉製造に関わる特殊性は原子炉压力容器の場合に類似するとみるならば、政策科学研究所(1977)によるエネルギー分析では压力容器の製造エネルギーは、 $4.96 \times 10^7 \sim 5.96 \times 10^7$  kcal/tとなっている。

核融合炉の製造エネルギーを推定する場合、(1)のように材料エネルギーとの比率から求めることも考えられるが、ここでは炉重量に基づいて算出する方法をとることにする。(2)と(3)で、航空機の製造エネルギーは压力容器の製造エネルギーの2.5倍となっているが、これは航空機に軽合金が多く使用されることを考慮すべきであろう。

以上から、核融合炉製造のEIは原子炉压力容器のものを使用することにして $5.96 \times 10^7$  kcal/tと仮定する。

## B-5. 炉設備を除く設備、建屋、輸送に要するエネルギー

相当詳細な概念設計であっても、炉設備以外の部分については詳細な諸元は与えられておらず、従って炉設備と同程度の材料インベントリは求められないのが普通である。部品当たりのEIを積み上げればよいのであるが、例えば発電設備のEIを求めること自身が大変な作業である。第二の方法として、炉設備以外は核分裂発電所と同じとみる立場がある。熱交換・発電部分は共通とみなすわけである。例えば、STARFIRE (Argonne National Laboratory, 1980)のコスト分析では表B-5のようになっている。表B-5の中の23、24番の項目は核分裂炉と共通とみてよいであろう。22.02は一次冷却方式によって内容が変わるが、STARFIREでは280~320℃、15.0~15.2MPaのH<sub>2</sub>Oを一次冷却材としており、PWRと同じである。22.03~22.07、25、26は核融合炉固有の面が多く核分裂炉をそのまま流用するのは難しい。しかし、価格は、

$$22.03 \sim 22.07 + 25 + 26 = 166.48 \times 10^6 \$$$

で、全体の9.6%であるからこの程度の誤差を認めるならば、核分裂炉を流用してもよいであろう。表B-5の21には土地造成と建屋が含まれるが、この内、建屋も核分裂炉のものを流用することにする。以下で、科学技術庁資源調査会(1979)と政策科学研究所(1977)による核分裂炉のエネルギー分析を参考にして炉設備を除く部分のEIを求める。

## (1)熱電変換設備等の材料エネルギー

資源調査会のデータから単位出力当たりのエネルギーを求めると $0.508 \times 10^9$  kcal/MW。(压力容器含む)

で、この値から圧力容器を $0.7t/MW_e$ としてその寄与分を除くと、 $0.487 \times 10^9 kcal/MW_e$ となる。政策科学研究所の場合では、 $0.440 \times 10^9 kcal/MW_e$ から圧力容器の部分を除いて $0.435 \times 10^9 kcal/MW_e$ となる。

表B-5. STARFIREのコスト分析  
単位は $10^6$ ドル(1980年価格)。

Account number	Account title	Costs
20	Land and land rights	3.30
21	Structures and site facilities	346.58
22	Reactor plant equipment	968.62
22.01	Reactor equipment	589.26
22.02	Main heat transfer and transport systems	69.84
22.03	Cryogenic cooling system	14.90
22.04	Radioactive waste treatment and disposal	4.80
22.05	Fuel handling and storage systems	38.60
22.06	Other reactor plant equipment	43.75
22.07	Instrumentation and control	23.41
23	Turbine plant equipment	249.68
24	Electric plant equipment	117.28
25	Miscellaneous plant equipment	40.77
26	Special materials	0.25
Total direct cost		1726.48

#### (2)熱電変換設備等の製造エネルギー

資源調査会では、発電機器および変電機器の製造エネルギーに基づいて $0.901 \times 10^9 kcal/MW_e$ と算出しているが、材料エネルギーと製造エネルギーの比率(B-4の項参照)からみるとこれは非常に大きい値である。政策科学研究所では $0.344 \times 10^9 kcal/MW_e$ (圧力容器は除く)である。

#### (3)建屋のエネルギー

資源調査会では、 $0.987 \times 10^9 kcal/MW_e$ (材料 $0.431 \times 10^9$ 、建設 $0.556 \times 10^9$ )である。政策科学研究所では、 $0.214 \times 10^9 kcal/MW_e$ (材料 $0.206 \times 10^9$ 、建設 $0.008 \times 10^9$ )である。政策科学研究所の値が小さいのは、セメント使用料が小さいこと、建設のEIが小さいことなどによる。逆に、資源調査会では、日本の原子力発電所の耐震設計のために重量が大きくなっている。いずれの場合も原子炉建屋は含まれているので、これを核融合炉の炉建屋とみなすことにする。

#### (4)資材輸送エネルギー

資源調査会では、資材・機器の輸送距離を平均500km(往復)として1t当たりの輸送エネルギーを $482 \times 10^3 kcal$ 、砂・砂利に関しては平均200kmとして $282 \times 10^3 kcal/t$ としている。資材重量 $160.2t/MW_e$ 、砂・砂利重量 $650.1t/MW_e$ より、資材・機器について

$$482 \times 10^3 (\text{kcal/t}) \times 160.2 (\text{t/MW}_e) = 0.077 \times 10^9 (\text{kcal/MW}_e)$$

また、砂・砂利について

$$282 \times 10^3 (\text{kcal/t}) \times 650.1 (\text{t/MW}_e) = 0.183 \times 10^9 (\text{kcal/MW}_e)$$

となる。核融合炉重量を20t/MW<sub>e</sub>とすると、炉設備の輸送エネルギーは0.010×10<sup>9</sup>kcal/MW<sub>e</sub>となり、合計では0.270×10<sup>9</sup>kcal/MW<sub>e</sub>となる。政策科学研究所では資材輸送は考慮されていない。

(1)~(4)から、核融合炉のエネルギー分析に使用するE Iを表B-6のようにした。

表B-6. 炉設備を除く設備、建屋、輸送のE I

	10 <sup>9</sup> kcal/MW <sub>e</sub>
炉設備を除く設備の材料エネルギー	0.487
炉設備を除く設備の製造エネルギー	0.344
建屋の建設に要するエネルギー	0.987
資材輸送エネルギー	0.270
合計	2.088

#### B-6. 土地造成に要するエネルギー

土地造成に要するエネルギーの算出には、関西国際空港（用地511ha）の空港施設の建設（関西国際空港株式会社、1985）を参考にする。ただし、ここでいう土地造成には土地整備に加えて道路・鉄道などの整備も含まれている。

##### (1) 1ha当たりの資材所要量

空港1ha当たりに投入される物量とエネルギーを表B-7に示す。ただし、空港施設には建屋が含まれているので、建屋の分を除くためにセメント・コンクリート、鋼材の所要量を原データのそれぞれ50%、20%とした。

##### (2) 工事に要するエネルギー

産業連関分析の土木事業部門（道路、河川、下水道、その他）の平均のE Iの内訳（資材エネルギー67.2%、直接消費エネルギー12.5%、その他20.3%）から、資材エネルギーの0.186倍を工事エネルギーとする。従って、表B-7から、

$$2.05 \times 10^9 \times 0.186 = 3.81 \times 10^8 (\text{kcal/ha})$$

となる。

##### (3) 資材輸送に要するエネルギー

1ha当たりの資材重量は表B-7から1.09×10<sup>4</sup>tとなる。ただし、セメント・コンクリートの比重を2.4、碎石を2.7とした。1984年版運輸白書によれば、1982年度の輸送機関（貨物）のエネルギー

一消費原単位は営業用トラックの場合603kcal/(t・km)である。従って、輸送距離を平均200km(往復)とすると輸送エネルギーは、

$$603(\text{kcal/t/km}) \times 1.09 \times 10^4 (\text{t/ha}) \times 200(\text{km}) = 1.31 \times 10^9 (\text{kcal/ha})$$

となる。

(1)~(3)から、土地造成に要するエネルギーは表B-8のようになる。

表B-7. 空港施設の建設に要する1ha当たりの所要量

	物量	E I	エネルギー投入量 (10 <sup>6</sup> kcal/ha)
セメント・コンクリート	1.12×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ha	4.03×10 <sup>5</sup> kcal/m <sup>3</sup>	451
アスファルト・コンクリート	1.98×10 <sup>3</sup> t/ha	5.76×10 <sup>5</sup> kcal/t	1140
砕石	2.29×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /ha	9.80×10 <sup>3</sup> kcal/m <sup>3</sup>	22
鋼材	7.83×10 t/ha	5.59×10 <sup>6</sup> kcal/t	438
合計			2051

- 1) 空港施設には建屋が含まれているので、建屋の分を除くためにセメント・コンクリート、鋼材の所要量を原データのそれぞれ50%、20%とした。
- 2) セメント・コンクリートは生コンクリートとする。E Iは1980年産業連関表から3.45×10<sup>7</sup>kcal/百万円、単価(1980年価格)は「生コンクリート統計年報」(1981)から11681円/m<sup>3</sup>である。
- 3) アスファルト・コンクリートのE Iは産業連関分析から3.51×10<sup>7</sup>kcal/百万円(その他のセメント製品部門)、単価(1980年価格)は「建材統計年報」(1983)から16410円/tとした。
- 4) 砕石のE Iは採取場における消費電力4.0kwh/m<sup>3</sup>(1kwh=2450kcal)に等しいとした。ただし、この値は科学技術庁資源調査会(1982)から採った。
- 5) 鋼材は粗鋼のE Iを用いた。

表B-8. 土地造成のE I

	10 <sup>6</sup> kcal/ha
資材エネルギー	2051
工事エネルギー	381
輸送エネルギー	1310
合計	3742

#### B-7. 人工島の埋め立てに要するエネルギー

人工島の埋め立てに要するエネルギーの算出には、関西国際空港(用地511ha)の建設を参考にする。空港予定地は、水深約16~19mで、海底には厚さ約16~22mの沖積粘土が堆積している。埋め立て後の地盤沈下を防ぐために、埋め立て前に粘土層中にパイプを打ち込み、パイプを通して砂を投入して排水路用の砂杭を作ったあと、粘土層にセメントミルクを注入して粘土を化学的に固結させることによって地盤改良を行う。し

かし、工事に要するエネルギーは、産業連関分析から推定するため、地盤改良のために採られる特殊な工法による工事エネルギーは考慮されていない。

(1) 1 ha 当たりの資材所要量

埋め立て地 1 ha 当たりに投入される物量とエネルギーを表B-9に示す。

表B-9. 人工島埋め立てに要する 1 ha 当たりの所要量

	物量	E I	エネルギー投入量 ( $10^6$ kcal/ha)
海砂	$2.74 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /ha	$9.80 \times 10^3$ kcal/m <sup>3</sup>	269
山砂	$3.25 \times 10^5$ m <sup>3</sup> /ha	$9.80 \times 10^3$ kcal/m <sup>3</sup>	3185
石材	$1.37 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /ha	$9.80 \times 10^3$ kcal/m <sup>3</sup>	134
生コンクリート	$4.50 \times 10^2$ m <sup>3</sup> /ha	$4.03 \times 10^5$ kcal/m <sup>3</sup>	181
セメント	$3.91 \times 10$ t/ha	$1.41 \times 10^6$ kcal/t	55
鋼材	$7.83 \times 10$ t/ha	$5.59 \times 10^6$ kcal/t	438
合計			4262

- 1) 砂、石材のE Iは、採取場における消費電力4.0kwh/m<sup>3</sup>(1kwh=2450kcal)に等しいとした。ただし、この値は科学技術庁資源調査会(1982)から採った。
- 2) 生コンクリートのE Iは、1980年産業連関表から $3.45 \times 10^7$  kcal/百万円、単価(1980年価格)は「生コンクリート統計年報」(1981)から11681円/m<sup>3</sup>である。
- 3) セメント、鋼材のE Iは産業連関分析から。ただし、鋼材は粗鋼のE Iを用いた。

(2) 工事に要するエネルギー

産業連関分析の土木事業部門(道路、河川、下水道、その他)の平均のE Iの内訳(資材エネルギー67.2%、直接消費エネルギー12.5%、その他20.3%)から、資材エネルギーの0.186倍を工事エネルギーとする。従って、表B-9から、

$$4.26 \times 10^9 \times 0.186 = 7.92 \times 10^8 \text{ (kcal/ha)}$$

となる。

(3) 資材輸送に要するエネルギー

1 ha 当たりの資材重量は、表B-9から $6.37 \times 10^5$  tとなる。ただし、海砂・山砂の比重を1.7、石材を2.7、生コンクリートを2.4とした。1984年版運輸白書によれば、1982年度の輸送機関(貨物)のエネルギー消費原単位は、営業用トラックの場合は603kcal/(t·km)また、海運の場合は135kcal/(t·km)である。従って、輸送距離を平均200km(往復)とすると輸送エネルギーは、

$$\text{陸路: } 603(\text{kcal/t/km}) \times 6.37 \times 10^5(\text{t/ha}) \times 200(\text{km}) = 7.68 \times 10^{10}(\text{kcal/ha})$$

$$\text{海路: } 135(\text{kcal/t/km}) \times 6.37 \times 10^5(\text{t/ha}) \times 200(\text{km}) = 1.72 \times 10^{10}(\text{kcal/ha})$$

となる。

(1)~(3)から、土地造成に要するエネルギーは表B-10のようになる。

表B-10人工島埋め立てのE I

資材の輸送手段	10 <sup>6</sup> kcal/ha	
	陸路	海路
資材エネルギー	4 2 6 2	4 2 6 2
工事エネルギー	7 9 2	7 9 2
輸送エネルギー	7 6 8 0 0	1 7 2 0 0
合計	8 1 8 5 4	2 2 2 5 4

〔参考文献〕

Argonne National Laboratory (1980) STARFIRE - a commercial tokamak fusion power plant study. ANL/FPP-80-1, Vol.1,2.

橋本康男他 (1983) 超電導線の製造工程. 三菱電機株式会社, 私信.

科学技術庁資源調査会 (1979) 衣・食・住のライフサイクルエネルギー, No. 69, 418pp.

科学技術庁資源調査会 (1982) エネルギー収支からみた自然エネルギー利用技術の評価手法に関する調査報告. No. 88, 538pp.

関西国際空港株式会社 (1985) 関西国際空港建設事業に係る環境影響評価準備書. 512pp.

茅陽一, 鈴木胖 (1982) 太陽エネルギー直接利用の将来. 地学雑誌, Vol. 91, No. 6, 93-102.

未来工学研究所 (1978) 核融合炉実現条件に関する調査分析.

NAGAI, T. (1984) Science Assessment on Energy Problems, especially about energy analysis of nuclear fusion and natural energy. Master Thesis, Department of Earth Sciences, Nagoya Univ., 84 pp.

太田定雄, 青田健一 (1983) ステンレス鋼等の製造工程. 神戸製鋼所, 私信.

政策科学研究所 (1977) エネルギー利用構造とエネルギー収支に関する調査. CR-76-12, 215pp.

## Appendix C

### 異常連鎖シミュレータのための構造モデル用データ

i) 本文図3-6の構造モデルから作成したデータ (データの終わりを示すために最後は数字で終わる。)

(AUXILIARY-HEATING LINK-TO FUEL-INJECTION)  
(AUXILIARY-HEATING LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(AUXILIARY-HEATING LINK-TO VACUUM-BOUNDARY)  
(AUXILIARY-HEATING HAS ENERGY-SOURCE)  
(BLANKET LINK-TO BLANKET-TRITIUM-RECOVERY)  
(BLANKET LINK-TO PRIMARY-COOLANT)  
(BLANKET LINK-TO VACUUM-BOUNDARY)  
(BLANKET HAS ENERGY-SOURCE)  
(BLANKET-TRITIUM-RECOVERY LINK-TO FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)  
(BLANKET-TRITIUM-RECOVERY LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION LINK-TO FUEL-INJECTION)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION LINK-TO FUEL-RECOVERY)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION LINK-TO WASTE-TREATMENT)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION HAS ENERGY-SOURCE)  
(FUEL-INJECTION LINK-TO FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)  
(FUEL-INJECTION LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(FUEL-INJECTION LINK-TO VACUUM-BOUNDARY)  
(FUEL-INJECTION HAS ENERGY-SOURCE)  
(FUEL-RECOVERY LINK-TO FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)  
(FUEL-RECOVERY LINK-TO PLASMA)  
(FUEL-RECOVERY LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(PLASMA LINK-TO VACUUM-BOUNDARY)  
(PRIMARY-COOLANT LINK-TO BLANKET)  
(PRIMARY-COOLANT LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(PRIMARY-COOLANT LINK-TO SECONDARY-COOLANT)  
(REACTOR-BUILDING LINK-TO ENVIRONMENT)  
(SECONDARY-COOLANT LINK-TO ENVIRONMENT)  
(VACUUM-BOUNDARY LINK-TO PLASMA)  
(VACUUM-BOUNDARY LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(VACUUM-BOUNDARY HAS ENERGY-SOURCE)  
(VENTILATION LINK-TO ENVIRONMENT)  
(WASTE-TREATMENT LINK-TO FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)  
(WASTE-TREATMENT LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(WASTE-TREATMENT HAS ENERGY-SOURCE)  
(WASTE-STORAGE LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(WASTE-STORAGE HAS ENERGY-SOURCE)  
0

ii) 発生防止、波及緩和のための対策を施した場合のデータ (Appendix D参照。上のi)のデータに付け加わる。)

(ISOLATION-VALVE-BETWEEN AUXILIARY-HEATING FUEL-INJECTION)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN AUXILIARY-HEATING VACUUM-BOUNDARY)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN BLANKET BLANKET-TRITIUM-RECOVERY)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN BLANKET PRIMARY-COOLANT)  
(BLANKET-TRITIUM-RECOVERY LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION  
WASTE-TREATMENT)  
(FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN FUEL-INJECTION VACUUM-BOUNDARY)

(FUEL-INJECTION LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN FUEL-RECOVERY PLASMA)  
(FUEL-RECOVERY LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN PRIMARY-COOLANT BLANKET)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN PRIMARY-COOLANT SECONDARY-COOLANT)  
(REACTOR-BUILDING HAS EMERGENCY-TRITIUM-RECOVERY-UNIT)  
(ISOLATION-VALVE-BETWEEN WASTE-TREATMENT  
FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)

## Appendix D

### 異常連鎖シミュレータの知識ベース

本知識ベースは、異常事象発生から最終的にトリチウムあるいは放射性物質 (R I) が環境に放出されるまでの過程を追跡するためのもので、プラズマ研究所 (1985) の安全評価報告書をもとにしている。

この知識ベースはプロダクション・システム PSL (Hasegawa, 1985) を用いて記述されている (ただし、プロダクション名は省略されている。)。条件部 (--->より前の部分) の要素で、EVで始まるものが発生した事象を、SRで始まるものが構造的関係を、それぞれ表わしている。

i) 異常事象の進展に関するルール (A~Dのルールの分類は、プラズマ研究所によるものと同じである。)

[A] 一つのサブシステムからトリチウムが放出される事故 (ただし、サブシステムの健全性には影響を与えない。)

A-1. FUEL-RECOVERY  
BLANKET-TRITIUM-RECOVERY } の温度上昇

- ・ (EV TEMPERATURE INCREASE-AT ?S)  
(SR ?S LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
--->  
(MAKE EV TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM ?S)

A-2. VACUUM-BOUNDARY  
AUXILIARY-HEATING  
BLANKET-TRITIUM-RECOVERY  
WASTE-TREATMENT } のトリチウム濃度上昇

- ・ (EV TRITIUM INCREASE-AT ?S)  
(SR ?S LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
--->  
(MAKE EV TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM ?S)

A-3. PLASMAのトリチウム濃度上昇

- ・ (EV TRITIUM INCREASE-AT ?S1)  
(SR ?S1 LINK-TO ?S2)  
--->  
(MAKE EV TRITIUM LEAK-TO ?S2 FROM ?S1)

A-4. BLANKETのトリチウム濃度上昇

- ・ A-3の場合と同じ。

[B] 一つのサブシステムからR Iが放出される事故

B-1. SECONDARY-COOLANT  
VENTILATION  
REACTOR-BUILDING } のR I濃度上昇

- ・ (EV RI INCREASE-AT ?S)  
(SR ?S LINK-TO ENVIRONMENT)  
--->  
(MAKE EV RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM ?S)

B-2. VENTILATIONの流量低下

- ・ (EV FLOW DECREASE-AT VENTILATION)  
---->  
(MAKE EV RI INCREASE-AT VENTILATION)

B-3. VENTILATION REACTOR-BUILDING } の破損・火災

- ・ (EV ?S FIRE)  
---->  
(MAKE EV ?S FAILURE)
- ・ (EV ?S FAILURE)  
(SR ?S LINK-TO ENVIRONMENT)  
---->  
(MAKE EV RI INCREASE-AT ENVIRONMENT)

[C] 一つのサブシステムの破損が、それに接続する他のサブシステムからのR Iの放出を引き起こす事故 (ただし、大きなenergy sourceの介入はない。)

C-1. VACUUM-BOUNDARY  
FUEL-RECOVERY  
BLANKET-TRITIUM-RECOVERY } の破損

- ・ (EV ?S1 FAILURE)  
(SR ?S1 LINK-TO ?S2)  
---->  
(MAKE EV RI LEAK-TO ?S2 FROM ?S1)

[D] energy sourceが介入して複数のサブシステムからR Iが放出される事故 (一つのサブシステムが破損し、それに接続するサブシステムからのR Iの放出を引き起こす場合と、接続するサブシステムの破損を引き起こす場合とがある。A、B、Cの場合と比較してより複雑になる。)

D-1. VACUUM-BOUNDARY  
AUXILIARY-HEATING  
FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION  
WASTE-STORAGE } の温度上昇

- ・ (EV TEMPERATURE INCREASE-AT ?S)  
(SR ?S HAS ENERGY-SOURCE)  
---->  
(MAKE EV ?S DAMAGED)

D-2. WASTE-STORAGEの圧力上昇

- ・ (EV PRESSURE INCREASE-AT ?S)  
---->  
(MAKE EV ?S DAMAGED)

D-3. VACUUM-BOUNDARYの遮蔽能力低下

- ・ (EV SHIELDING DEGRADE-AT VACUUM-BOUNDARY)  
---->  
(MAKE EV NEUTRON-FLUX LEAK-TO REACTOR-BUILDING)

D-4. PLASMAの出力上昇

- ・ (EV FUSION-POWER INCREASE-AT PLASMA)  
---->  
(MAKE EV NEUTRON-FLUX LEAK-TO REACTOR-BUILDING)

D-5. BLANKETの圧力上昇

- ・ D-2の場合と同じ。

D-6. BLANKETの温度上昇

- ・ D-1の場合と同じ。

D-7. PRIMARY-COOLANT-OUTSIDE-BLANKETの破損

- ・ (EV PRIMARY-COOLANT-OUTSIDE-BLANKET FAILURE)  
---->  
(MAKE EV RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM PRIMARY-COOLANT)  
(MAKE EV TEMPERATURE INCREASE-AT BLANKET)

D-8. PRIMARY-COOLANT-INSIDE-BLANKETの破損

- ・ (EV PRIMARY-COOLANT-INSIDE-BLANKET FAILURE)  
---->  
(MAKE EV RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM PRIMARY-COOLANT)  
(MAKE EV TEMPERATURE INCREASE-AT BLANKET)

D-9. BLANKETの破損・火災

- ・ (EV ?S FIRE)  
---->  
(MAKE EV ?S FAILURE)
- ・ (EV ?S1 FAILURE)  
(SR ?S1 LINK-TO ?S2)  
(SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE)  
---->  
(MAKE EV ?S2 DAMAGED)  
(MAKE EV RI LEAK-TO ?S2 FROM ?S1)

D-10. WASTE-STORAGEの破損・火災

- ・ D-9の場合と同じ。

D-11. WASTE-TREATMENTの破損・火災

- ・ D-9の場合と同じ。

D-12. AUXILIARY-HEATINGの破損・火災

- ・ D-9の場合と同じ。

D-13. FUEL-INJECTIONの破損・火災

- ・ D-9の場合と同じ。

D-14. FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATIONの破損・火災

- ・ D-9の場合と同じ。

以上に出てこなかったルールとして、次の5つがある。

- ・ (EV ?R LEAK-TO ?S)  
---->  
(MAKE EV ?R INCREASE-AT ?S)
- ・ (EV ?S DAMAGED)  
---->  
(MAKE EV ?S FAILURE)
- ・ (EV NEUTRON-FLUX INCREASE-AT REACTOR-BUILDING)  
---->  
(MAKE EV NEUTRON-FLUX LEAK-TO ENVIRONMENT)  
(MAKE EV SUPERCONDUCTING-MAGNET QUENCH)
- ・ (EV SUPERCONDUCTING-MAGNET QUENCH)  
---->  
(MAKE EV MISSILE GENERATION)
- ・ (EV MISSILE GENERATION)  
---->  
(MAKE EV VACUUM-BOUNDARY DAMAGED)

## ii) 異常連鎖の防止に関するルール

異常事象の発生を防止するため、あるいは、異常連鎖の発展を防止するための対策として、プラズマ研究所は次の四つを上げている。

- ①部分格納室 (漏洩防止のためのサブシステムのブロック化)
- ②緊急トリチウム処理機能
- ③隔離機能 (隔離弁など)
- ④区画壁、区画配置の最適化 (隔壁の設置、直接衝撃を受けないような配置)

しかし、これらの対策は、その概念が必ずしも明確ではなく、特に④に関しては、構造的関係が二次元的あるいは三次元的になるため、現在の知識ベース・システムではルールとして記述することは困難である。よって、①～③についてのみ、以下のようにルールとして表現した。ただし、動作部 (---->より後ろの部分) には、メッセージを出力する命令のみで、作業記憶に新たに要素をつくる命令はない。

- ・ (EV TEMPERATURE INCREASE-AT ?S)  
(SR ?S LINK-TO REACTOR-BUILDING)  
(SR ?S LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)  
---->  
(WRITE \*\*\* LEAKPROOF ?S INTACT \*\*\*)
- ・ (EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1)  
(SR ?S1 LINK-TO ?S2)  
(SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)  
---->  
(WRITE \*\*\* LEAKPROOF ?S1 INTACT \*\*\*)
- ・ (EV ?S1 FAILURE)  
(SR ?S1 LINK-TO ?S2)  
(SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)  
---->  
(WRITE \*\*\* LEAKPROOF ?S1 INTACT \*\*\*)

```

· (EV ?S1 FAILURE)
  (SR ?S1 LINK-TO ?S2)
  (SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE)
  (SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)
  ---->
  (WRITE *** LEAKPROOF ?S1 INTACT ***)

· (EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1)
  (SR ?S1 LINK-TO ?S2)
  (SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---->
  (WRITE *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1 AND ?S2 CLOSED ***)

· (EV ?S1 FAILURE)
  (SR ?S1 LINK-TO ?S2)
  (SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---->
  (WRITE *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1 AND ?S2 CLOSED ***)

· (EV ?S1 FAILURE)
  (SR ?S1 LINK-TO ?S2)
  (SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE)
  (SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---->
  (WRITE *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1 AND ?S2 CLOSED ***)

· (EV PRIMARY-COOLANT-OUTSIDE-BLANKET FAILURE)
  (SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN PRIMARY-COOLANT BLANKET)
  ---->
  (WRITE *** ISOLATION VALVE BETWEEN PRIMARY-COOLANT
              AND BLANKET CLOSED ***)
  (MAKE EV RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM PRIMARY-COOLANT)

· (EV TRITIUM INCREASE-AT ?S1)
  (SR ?S1 LINK-TO ?S2)
  (SR ?S1 HAS EMERGENCY-TRITIUM-RECOVERY-UNIT)
  ---->
  (WRITE *** EMERGENCY TRITIUM RECOVERY UNIT AT ?S1
              INVOKED ***)

```

[参考文献]

HASEGAWA, A. (1985) Expert Systems and Earth Sciences - Expert Shell PSL and Its Application. Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol.33, 1-48.

プラズマ研究所 (1985) 核融合炉システムの安全評価成果報告書. 名古屋大学, 235pp.

## Appendix E

異常連鎖シミュレータのソース・プログラム

```

(RULE NOR)
ITERALIZE A MODE SOURCE EVENT SUBSYSTEM FROM STEP)
ITERALIZE B MODE X1 X2 X3 X4 STEP)
ITERALIZE XX X1 X2 X3 X4 STEP)
I1 (INIT) --->
    (WRITE (CRLF) "ENTER A FILE NAME OF STRUCTURAL DATA")
    (BIND ?X (ACCEPT))
    ($SET KK ?X)
    (MAKE INIT2)
    (REMOVE 1))
I2 (INIT2) ---> (MAKE INPUT)
    ($SET II 0)
    (REMOVE 1))
I3 (INPUT) ---> (BIND ?X ($EVAL KK))
    (MAKE YY (ACCEPT ?X))
    (REMOVE 1))
I4 (YY (?X1 (&)) ?X2 ?X3) --->
    (MAKE A SR ?X1 ?X2 ?X3 :STEP -1)
    (MAKE INPUT)
    (REMOVE 1))
I5 (YY (?X (#))) ---> (WRITE (CRLF) "ENTER AN INITIATOR")
    (BIND ?Y (ACCEPT))
    (WRITE (CRLF) "INITIAL EVENT --->" ?Y (CRLF))
    (MAKE XX ?Y)
    (BIND ?Z ($EVAL KK))
    (CLOSE ?Z)
    (REMOVE 1))
I6 (XX (?X1 (<> END)) ?X2 ?X3 ?X4 ?ST) --->
    (MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 0)
    (MAKE RUN)
    (REMOVE 1))
I7 (XX (?X1 (= END)) ?X2 ?X3 ?X4 ?ST) --->
    (MAKE EXIT)
    (REMOVE 1))
C111 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 ?X3 (?X4 (<> NIL)) (?ST (<= (VAL II)))) --->
    (BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
    (WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2 ?X3 FROM ?X4)
    ($SET II ?ST)
    ($SET WORK NIL)
    ($*PUSH* 0)
    ($*PUSH* (WW ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST))
    (MAKE RETREAT)
    (REMOVE 1))
C112 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 ?X3 (?X4 (<> NIL)) (?ST (> (VAL II)))) --->
    (BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
    (WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2 ?X3 FROM ?X4)
    ($SET II ?ST)
    (MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST)
    (REMOVE 1))
C121 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 (?X3 (<> NIL)) (?X4 (= NIL))
    (?ST (<= (VAL II)))) --->
    (BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
    (WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2 ?X3)
    ($SET II ?ST)
    ($SET WORK NIL)

```

```

($*PUSH* 0)
($*PUSH* (WW ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST))
(MAKE RETREAT)
(REMOVE 1))
(P C122 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 (?X3 (<> NIL)) (?X4 (= NIL))
(?ST (> (VAL II)))) --->
(BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
(WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2 ?X3)
($SET II ?ST)
(MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST)
(REMOVE 1))
(P C131 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 (?X3 (= NIL)) ?X4 (?ST (<= (VAL II)))) --->
(BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
(WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2)
($SET II ?ST)
($SET WORK NIL)
($*PUSH* 0)
($*PUSH* (WW ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST))
(MAKE RETREAT)
(REMOVE 1))
(P C132 (A ZZ (?X1 (&)) ?X2 (?X3 (= NIL)) ?X4 (?ST (> (VAL II)))) --->
(BIND ?T (COMPUTE 3 * ?ST - 3))
(WRITE (TAB ?T) ?ST ?X1 ?X2)
($SET II ?ST)
(MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?ST)
(REMOVE 1))
(P C21 (RETREAT)(A ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?X5 ?X6) --->
($*PUSH* (?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?X5 ?X6))
(MODIFY 1)
(REMOVE 2))
(P C22 (RETREAT) ---> (REMOVE 1)
(NW)
(MAKE RE-INPUT))
(P C3 (RE-INPUT) ---> (BIND ?X ($*POP*))
(MAKE B ?X)
(REMOVE 1))
(P C41 (B SR ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (>= (VAL II)))) --->
(MAKE A SR ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 -1)
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C42 (B SR ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (< (VAL II)))) --->
(MAKE A SR ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?S)
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C51 (B EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (>= (VAL II)))) --->
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C52 (B EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (< (VAL II)))) --->
(MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?S)
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C6 (B ZZ ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (<= (VAL II)))) --->
(MAKE A ZZ ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?S)
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C7 (B WW ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 (?S (= (VAL II)))) --->
(MAKE A EV ?X1 ?X2 ?X3 ?X4 ?S)
(MAKE RE-INPUT)
(REMOVE 1))
(P C9 (B O) ---> (REMOVE 1))

```

```

(P R00 (RUN) ---> (REMOVE 1))
(P R011 (A EV TEMPERATURE INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO REACTOR-BUILDING :STEP (?R (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING ?S1 :STEP ?T2)
  (MAKE A DISCONNECT REACTOR-BUILDING ?S1 :STEP ?T1))
(P R012 (A EV TEMPERATURE INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO REACTOR-BUILDING :STEP (?R (= -1)))
  (A SR ?S1 LEAKPROOF-TO REACTOR-BUILDING)
  ---> (MODIFY 3)
  (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
  (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** LEAKPROOF ?S1 INTACT ***)
  (MAKE A DISCONNECT REACTOR-BUILDING ?S1 :STEP ?T1))
(P R02 (A EV ?R LEAK-TO ?S :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?R INCREASE-AT ?S :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R031 (A EV TEMPERATURE INCREASE-AT (?S (= VACUUM-BOUNDARY))
  :STEP ?T1)
  (A SR ?S HAS ENERGY-SOURCE :STEP (?R (= -1))) --->
  (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?S DAMAGED :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R032 (A EV TEMPERATURE INCREASE-AT (?S (<> VACUUM-BOUNDARY))
  :STEP ?T1)
  (A SR ?S HAS ENERGY-SOURCE :STEP (?R (= -1))) --->
  (MODIFY 2)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?S DAMAGED :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R041 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT
  (?S1 (OR (= VACUUM-BOUNDARY)(= AUXILIARY-HEATING)
  (= BLANKET-TRITIUM-RECOVERY)(= WASTE-TREATMENT)))
  :STEP (?T1 (= 0)))
  (A SR ?S1 LINK-TO REACTOR-BUILDING :STEP (?ST (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (REMOVE 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?R LEAK-TO REACTOR-BUILDING ?S1 :STEP ?T2))
(P R042 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT
  (?S1 (OR (= PLASMA)(= BLANKET))) :STEP (?T1 (= 0)))
  (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?ST (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?R LEAK-TO ?S2 ?S1 :STEP ?T2)
  (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R043 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1
  :STEP (?T1 (> 0)))
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?ST (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?R LEAK-TO ?S2 ?S1 :STEP ?T2))

```

```

      (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R044 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (= ENVIRONMENT)) :STEP (?ST (= -1)))
  ---> (MODIFY 2)
      (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
      (MAKE A ZZ ?R LEAK-TO ?S2 ?S1 :STEP ?T2)
      (REMOVE 1))
(P R045 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT
  (?S1 (OR (= PLASMA)(= BLANKET))) :STEP (?T1 (= 0)))
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?ST (= -1)))
  (A SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---> (MODIFY 3)
      (MODIFY 2 :STEP ?T1)
      (MODIFY 1)
      (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
      (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
      (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1
        AND ?S2 CLOSED ***)
      (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R046 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1
  :STEP (?T1 (> 0)))
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?ST (= -1)))
  (A SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---> (MODIFY 3)
      (MODIFY 2 :STEP ?T1)
      (MODIFY 1)
      (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
      (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
      (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1
        AND ?S2 CLOSED ***)
      (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R047 (A EV (?R (OR (= TRITIUM)(= RI))) INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?ST (= -1)))
  (A SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)
  ---> (MODIFY 3)
      (MODIFY 2 :STEP ?T1)
      (MODIFY 1)
      (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
      (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
      (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** LEAKPROOF ?S1 INTACT ***)
      (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R048 (A EV (?R (= TRITIUM)) INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?ST (= -1)))
  (A SR ?S1 HAS EMERGENCY-TRITIUM-RECOVERY-UNIT)
  ---> (MODIFY 3)
      (MODIFY 2 :STEP ?T1)
      (MODIFY 1)
      (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
      (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
      (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** EMERGENCY TRITIUM RECOVERY UNIT AT
        ?S1 INVOKED ***))
(P R05 (A EV FLOW DECREASE-AT VENTILATION :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ RI INCREASE-AT VENTILATION :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R06 (A EV ?S FIRE :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?S FAILURE :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R071 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)

```

```

(A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?R (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
        (MODIFY 1)
        (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
        (MAKE A ZZ RI LEAK-TO ?S2 ?S1 :STEP ?T2)
        (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R072 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (= ENVIRONMENT)) :STEP (?R (= -1)))
    ---> (MODIFY 2)
          (REMOVE 1)
          (MAKE A EV RI INCREASE-AT ?S1 :STEP ?T1))
(P R073 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?R (= -1)))
  (A SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---> (MODIFY 3)
        (MODIFY 2 :STEP ?T1)
        (MODIFY 1)
        (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
        (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
        (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1
              AND ?S2 CLOSED ***)
        (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R074 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO (?S2 (<> ENVIRONMENT)) :STEP (?R (= -1)))
  (A SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)
  ---> (MODIFY 3)
        (MODIFY 2 :STEP ?T1)
        (MODIFY 1)
        (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
        (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
        (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** LEAKPROOF ?S1 INTACT ***)
        (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R081 (A EV PRESSURE INCREASE-AT ?S :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?S DAMAGED :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R09 (A EV SHIELDING DEGRADE-AT VACUUM-BOUNDARY :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ NEUTRON-FLUX LEAK-TO REACTOR-BUILDING :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R10 (A EV NEUTRON-FLUX INCREASE-AT REACTOR-BUILDING :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ NEUTRON-FLUX LEAK-TO ENVIRONMENT REACTOR-BUILDING
    :STEP ?T2)
  (MAKE A ZZ SUPERCONDUCTING-MAGNET QUENCH :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R11 (A EV SUPERCONDUCTING-MAGNET QUENCH :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ MISSILE GENERATION :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R121 (A EV MISSILE GENERATION :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ VACUUM-BOUNDARY DAMAGED :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R13 (A EV FUSION-POWER INCREASE-AT PLASMA :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ NEUTRON-FLUX LEAK-TO REACTOR-BUILDING :STEP ?T2)
  (REMOVE 1))
(P R141 (A EV PRIMARY-COOLANT-OUTSIDE-BLANKET FAILURE :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))

```

```

(MAKE A ZZ RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING PRIMARY-COOLANT :STEP ?T2)
(MAKE A ZZ TEMPERATURE INCREASE-AT BLANKET :STEP ?T2)
(MAKE A DISCONNECT BLANKET PRIMARY-COOLANT :STEP ?T1)
(MAKE A DISCONNECT PRIMARY-COOLANT BLANKET :STEP ?T1)
(REMOVE 1))
(P R142 (A EV PRIMARY-COOLANT-OUTSIDE-BLANKET FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN PRIMARY-COOLANT BLANKET) --->
  (MODIFY 2)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
  (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** ISOLATION VALVE BETWEEN PRIMARY-COOLANT
    AND BLANKET CLOSED ***)
  (MAKE A ZZ RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING PRIMARY-COOLANT :STEP ?T2)
  (MAKE A DISCONNECT BLANKET PRIMARY-COOLANT :STEP ?T1)
  (MAKE A DISCONNECT PRIMARY-COOLANT BLANKET :STEP ?T1)
  (REMOVE 1))
(P R15 (A EV PRIMARY-COOLANT-INSIDE-BLANKET FAILURE :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY PRIMARY-COOLANT :STEP ?T2)
  (MAKE A ZZ TEMPERATURE INCREASE-AT BLANKET :STEP ?T2)
  (MAKE A DISCONNECT BLANKET PRIMARY-COOLANT :STEP ?T1)
  (MAKE A DISCONNECT PRIMARY-COOLANT BLANKET :STEP ?T1)
  (REMOVE 1))
(P R161 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?R1 (= -1)))
  (A SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE :STEP (?R2 (= -1)))
  ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 3)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (MAKE A ZZ ?S2 DAMAGED :STEP ?T2)
  (MAKE A ZZ RI LEAK-TO ?S2 ?S1 :STEP ?T2)
  (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R162 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?R1 (= -1)))
  (A SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE :STEP (?R2 (= -1)))
  (A SR ISOLATION-VALVE-BETWEEN ?S1 ?S2)
  ---> (MODIFY 4)
  (MODIFY 3)
  (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
  (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** ISOLATION VALVE BETWEEN ?S1
    AND ?S2 CLOSED ***)
  (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R163 (A EV ?S1 FAILURE :STEP ?T1)
  (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?R1 (= -1)))
  (A SR ?S1 HAS ENERGY-SOURCE :STEP (?R2 (= -1)))
  (A SR ?S1 LEAKPROOF-TO ?S2)
  ---> (MODIFY 4)
  (MODIFY 3)
  (MODIFY 2 :STEP ?T1)
  (MODIFY 1)
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))
  (BIND ?T3 (COMPUTE 3 * ?T1))
  (WRITE (TAB ?T3) ?T2 *** LEAKPROOF ?S1 INTACT ***)
  (MAKE A DISCONNECT ?S2 ?S1 :STEP ?T1))
(P R17 (A EV ?S DAMAGED :STEP ?T1) --->
  (BIND ?T2 (COMPUTE ?T1 + 1))

```

```

      (MAKE A ZZ ?S FAILURE :STEP ?T2)
      (REMOVE 1))
(P R181 (A DISCONNECT ?S1 ?S2 :STEP ?T1)
      (A SR ?S1 LINK-TO ?S2 :STEP (?R (= -1)))
      ---> (MODIFY 2 :STEP ?T1)
      (REMOVE 1))
(P R182 (A DISCONNECT ?S1 ?S2 :STEP ?T1)
      ---> (REMOVE 1))
(P NOR (VOID) ---> (NW)
      (MAKE INIT2))
(P EX (EXIT) ---> (REMOVE 1)
      (HALT))

(NW)
(MAKE INIT)

%(DEFUN *PUSH* (X)
  (PUSH X WORK))
%(DEFUN *POP* ()
  (POP WORK))

```

## Appendix F

### 異常連鎖シミュレータの実行例

エキスパート・シェルPSLはUTILISP (Chikayama, 1981) で記述されている。以下の実行例は名古屋大学大型計算機センターのFACOM-M780を使用して行ったものである。下線を引いた部分が入力である。

```
READY
utilisp                               : UTILISPの起動
> (exfile 'psl.code)                  : PSLのコードの読み込み
NIL
> (psl)                                : PSLの起動
PSL> (load risk.data)                 : シミュレータのソース・プログラムの読み込み
*PUSH*
*POP*
PSL> (run)                             : シミュレータの起動

ENTER A FILE NAME OF STRUCTURAL DATA
ACCEPT> sr1.data                     : 構造データ (本文図3-6) の読み込み

ENTER AN INITIATOR
ACCEPT> (tritium increase-at blanket) : 初期事象の入力

INITIAL EVENT ---> (TRITIUM INCREASE-AT BLANKET)

1 TRITIUM LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM BLANKET
  2 TRITIUM INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
    3 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
      4 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
        5 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
          6 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT
            3 TRITIUM LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
              4 TRITIUM INCREASE-AT PLASMA
                1 TRITIUM LEAK-TO PRIMARY-COOLANT FROM BLANKET
                  2 TRITIUM INCREASE-AT PRIMARY-COOLANT
                    3 TRITIUM LEAK-TO SECONDARY-COOLANT FROM PRIMARY-COOLANT
                      4 TRITIUM INCREASE-AT SECONDARY-COOLANT
                        5 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM SECONDARY-COOLANT
                          6 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT
                            3 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM PRIMARY-COOLANT
                              4 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
                                5 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
                                  6 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT
                                    1 TRITIUM LEAK-TO BLANKET-TRITIUM-RECOVERY FROM BLANKET
                                      2 TRITIUM INCREASE-AT BLANKET-TRITIUM-RECOVERY
                                        3 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM BLANKET-TRITIUM-RECOVERY
                                          4 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
                                            5 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
                                              6 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT
                                                3 TRITIUM LEAK-TO FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION FROM BLANKET-TRITIU
M-RECOVERY
                                                  4 TRITIUM INCREASE-AT FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
                                                    5 TRITIUM LEAK-TO WASTE-TREATMENT FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEP
ARATION
                                                      6 TRITIUM INCREASE-AT WASTE-TREATMENT
                                                        7 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM WASTE-TREATMEN
T
```

8 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 9 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILD  
 ING  
 10 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT  
 PARATION 5 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SE  
 6 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 7 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING  
 8 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT  
 ATION 5 TRITIUM LEAK-TO FUEL-RECOVERY FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPAR  
 6 TRITIUM INCREASE-AT FUEL-RECOVERY  
 7 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-RECOVERY  
 8 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 9 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILD  
 ING  
 10 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT  
 7 TRITIUM LEAK-TO PLASMA FROM FUEL-RECOVERY  
 8 TRITIUM INCREASE-AT PLASMA  
 9 TRITIUM LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM PLASMA  
 10 TRITIUM INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY  
 11 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM V  
 VACUUM-BOUNDARY  
 12 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 13 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM  
 REACTOR-BUILDING  
 14 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMEN  
 T  
 5 TRITIUM LEAK-TO FUEL-INJECTION FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPA  
 RATION  
 6 TRITIUM INCREASE-AT FUEL-INJECTION  
 7 TRITIUM LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM FUEL-INJECTION  
 8 TRITIUM INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY  
 9 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-B  
 OUNDARY  
 10 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 11 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTO  
 R-BUILDING  
 12 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT  
 9 TRITIUM LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY  
 10 TRITIUM INCREASE-AT PLASMA  
 7 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-INJECTION  
 8 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 9 TRITIUM LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILD  
 ING  
 10 TRITIUM INCREASE-AT ENVIRONMENT

ENTER AN INITIATOR

ACCEPT> (temperature increase-at fuel-clean-up-and-separation)

INITIAL EVENT ---> (TEMPERATURE INCREASE-AT FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)

1 FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION DAMAGED  
 2 FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION FAILURE  
 3 RI LEAK-TO WASTE-TREATMENT FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION  
 4 RI INCREASE-AT WASTE-TREATMENT  
 5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM WASTE-TREATMENT  
 6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING  
 7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING

- 8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 WASTE-TREATMENT DAMAGED
  - 4 WASTE-TREATMENT FAILURE
    - 5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM WASTE-TREATMENT
    - 6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
    - 7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    - 8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  - 5 REACTOR-BUILDING DAMAGED
    - 6 REACTOR-BUILDING FAILURE
      - 7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
      - 8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
  - 4 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
    - 5 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    - 6 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 REACTOR-BUILDING DAMAGED
  - 4 REACTOR-BUILDING FAILURE
    - 5 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    - 6 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 RI LEAK-TO FUEL-RECOVERY FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
  - 4 RI INCREASE-AT FUEL-RECOVERY
    - 5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-RECOVERY
      - 6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
      - 7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
      - 8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
    - 5 RI LEAK-TO PLASMA FROM FUEL-RECOVERY
      - 6 RI INCREASE-AT PLASMA
      - 7 RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM PLASMA
      - 8 RI INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
      - 9 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
- RY
  - 10 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
  - 11 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUI
- LDING
  - 12 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 FUEL-RECOVERY DAMAGED
  - 4 FUEL-RECOVERY FAILURE
    - 5 RI LEAK-TO PLASMA FROM FUEL-RECOVERY
      - 6 RI INCREASE-AT PLASMA
      - 7 RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM PLASMA
      - 8 RI INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
      - 9 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
- RY
  - 10 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
  - 11 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUI
- LDING
  - 12 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-RECOVERY
  - 6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
  - 7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
  - 8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
- 3 RI LEAK-TO FUEL-INJECTION FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
  - 4 RI INCREASE-AT FUEL-INJECTION
    - 5 RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM FUEL-INJECTION
      - 6 RI INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
      - 7 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
      - 8 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
      - 9 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
      - 10 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
    - 7 RI LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY

```

      8 RI INCREASE-AT PLASMA
    5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-INJECTION
      6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
      7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
      8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
3 FUEL-INJECTION DAMAGED
  4 FUEL-INJECTION FAILURE
    5 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM FUEL-INJECTION
    6 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
    7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  5 REACTOR-BUILDING DAMAGED
    6 REACTOR-BUILDING FAILURE
    7 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    8 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  5 RI LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM FUEL-INJECTION
    6 RI INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
    7 RI LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
    8 RI INCREASE-AT PLASMA
    7 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
    8 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
    9 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    10 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  5 VACUUM-BOUNDARY DAMAGED
    6 VACUUM-BOUNDARY FAILURE
    7 RI LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
    8 RI INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
    9 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    10 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  7 REACTOR-BUILDING DAMAGED
    8 REACTOR-BUILDING FAILURE
    9 RI LEAK-TO ENVIRONMENT FROM REACTOR-BUILDING
    10 RI INCREASE-AT ENVIRONMENT
  7 RI LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
    8 RI INCREASE-AT PLASMA
  7 PLASMA DAMAGED
    8 PLASMA FAILURE

```

ENTER AN INITIATOR

ACCEPT> (end)

: シミュレーションの終了

INITIAL EVENT ---> (END)

HALT

PSL> (nw)

PSL> (make init)

PSL> (run)

} シミュレータの再起動

ENTER A FILE NAME OF STRUCTURAL DATA

ACCEPT> sr2.data

: 構造データ (本文図3-7) の読み込み

ENTER AN INITIATOR

ACCEPT> (tritium increase-at blanket)

INITIAL EVENT ---> (TRITIUM INCREASE-AT BLANKET)

1 TRITIUM LEAK-TO VACUUM-BOUNDARY FROM BLANKET

```

2 TRITIUM INCREASE-AT VACUUM-BOUNDARY
3 TRITIUM LEAK-TO REACTOR-BUILDING FROM VACUUM-BOUNDARY
4 TRITIUM INCREASE-AT REACTOR-BUILDING
5 *** EMERGENCY TRITIUM RECOVERY UNIT AT REACTOR-BUILDING IN
VOKED ***
3 TRITIUM LEAK-TO PLASMA FROM VACUUM-BOUNDARY
4 TRITIUM INCREASE-AT PLASMA
1 *** ISOLATION VALVE BETWEEN BLANKET AND PRIMARY-COOLANT CLOSED ***
1 *** ISOLATION VALVE BETWEEN BLANKET AND BLANKET-TRITIUM-RECOVERY CLOSE
D ***

```

```

ENTER AN INITIATOR
ACCEPT> (temperature increase-at fuel-clean-up-and-separation)

```

```

INITIAL EVENT ---> (TEMPERATURE INCREASE-AT FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION)

```

```

1 FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION DAMAGED
2 FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION FAILURE
3 *** ISOLATION VALVE BETWEEN FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION AND WAS
TE-TREATMENT CLOSED ***
3 *** LEAKPROOF FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION INTACT ***
3 RI LEAK-TO FUEL-RECOVERY FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
4 RI INCREASE-AT FUEL-RECOVERY
5 *** LEAKPROOF FUEL-RECOVERY INTACT ***
5 *** ISOLATION VALVE BETWEEN FUEL-RECOVERY AND PLASMA CLOSE
D ***
3 FUEL-RECOVERY DAMAGED
4 FUEL-RECOVERY FAILURE
5 *** ISOLATION VALVE BETWEEN FUEL-RECOVERY AND PLASMA CLOSE
D ***
5 *** LEAKPROOF FUEL-RECOVERY INTACT ***
3 RI LEAK-TO FUEL-INJECTION FROM FUEL-CLEAN-UP-AND-SEPARATION
4 RI INCREASE-AT FUEL-INJECTION
5 *** ISOLATION VALVE BETWEEN FUEL-INJECTION AND VACUUM-BOUN
DARY CLOSED ***
5 *** LEAKPROOF FUEL-INJECTION INTACT ***
3 FUEL-INJECTION DAMAGED
4 FUEL-INJECTION FAILURE
5 *** LEAKPROOF FUEL-INJECTION INTACT ***
5 *** ISOLATION VALVE BETWEEN FUEL-INJECTION AND VACUUM-BOUN
DARY CLOSED ***

```

```

ENTER AN INITIATOR
ACCEPT> (end)

```

```

INITIAL EVENT ---> (END)

```

```

HALT
PSL> (exit) : PSLの終了
NIL
> (quit) : UTILISPの終了
READY

```

[参考文献]

CHIKAYAMA, T. (1981) UTILISP MANUAL. Department of Mathematical Engineering and Instrumentation Physics, University of Tokyo, METR 81-6.

## Appendix G

### 磁場閉じ込め、慣性閉じ込め以外の制御核融合について

本論文では、材料インベントリーがわかる程度に詳細な概念設計が得られる、すなわち、材料インベントリー段階にある（第一章の図1-1参照）磁場閉じ込め核融合炉および慣性閉じ込め核融合炉の概念設計を対象に資源・経済アセスメント（REA）およびリスク・アセスメント（RA）を行った。REAでは、エネルギー分析の手法を用いて、

- ・稀少資源の入手可能性
- ・核融合炉のエネルギー供給手段としての有効性

を評価した。また、RAでは、

- ・トリチウムおよび誘導放射能の存在量
- ・放射性廃棄物の発生量
- ・運転時および事故時に周辺公衆へ及ぼす影響

を評価した。以下では、本研究の対象とならなかった、材料インベントリー段階に達していないその他の制御核融合について、これらの項目に関して簡単に触れておくことにする。

#### G-1. ミュオン触媒核融合

ミュオン触媒核融合は、加速器を使って作り出される素粒子ミュオン ( $\mu^-$ ) を触媒として重水素 (D) とトリチウム (T) の核融合反応を起こさせるものである。ミュオン1個当たり100回以上の核融合反応を起こすことが近年になって知られるようになり、ミュオン触媒核融合炉の実用化が議論されるようになってきた (Jones、1986; Rafelski and Jones、1987; 永嶺、1988)。ミュオン触媒核融合炉は、現在シナリオ段階にあると考えられるが、REAおよびRAの立場からみた特徴は、

- ・ミュオンを作り出すために加速器が必要となる
- ・荷電粒子を反応容器内に閉じ込めるために超電導マグネットが使用される

さらに、D-T反応を目指す限り、

- ・トリチウム増殖材としてリチウム (Li) が必要となる
- ・発電所内にはトリチウムが存在し、D-T反応からの中性子により誘導放射能が発生する

など、定量的に評価することはできないが、磁場閉じ込め核融合炉や慣性閉じ込め核融合炉の場合と共通あるいは類似する部分が非常に多い。また、ミュオン触媒核融合による核融合・核分裂ハイブリッド炉の提案もなされているが、これに関しても、本研究で検討した核融合・核分裂ハイブリッド炉の場合と共通あるいは類似する部

分が多いと考えられる。

## G-2. 常温核融合

ここで常温核融合とは、Fleischmann and Pons (1989) および Jones et al. (1989) が行なった、重水 (D<sub>2</sub>O) の電気分解などによるパラジウム (Pd) やチタン (Ti) などの物質中で起こる核融合現象を指すことにする (永嶺 (1989) は、物質内核融合と呼ぶことを提案している。)。電解法のほかに、パラジウム電極を使った放電による常温核融合も報告されている (Wada and Nishizawa, 1989)。

Fleischmann and Ponsの実験では、パラジウム電極1cm<sup>3</sup>当たり0.002~21Wの過剰熱が観測されたが、この過剰熱を、



の二つの核融合反応だけで説明しようとする、 $4 \times 10^9 \sim 4 \times 10^{13}$  回/sec程度の反応が起こらなくてはならない。しかし、観測された中性子の発生は $4 \times 10^4$  個/sec、また、トリチウムの発生は $1 \sim 2 \times 10^4$  個/secであるため、熱発生は、(Fleischmann and Ponsの実験が正しいとして) 新しいタイプの核融合反応あるいは新しい化学反応によるものであるとする考え方もあり (永嶺、1989)、現在のところ常温核融合の実用化を議論する段階には至っていない。

常温核融合は、特殊かつ大型の装置を必要としないという点で、その他の制御核融合とは大きく異なっており、巨大科学ではない核融合研究の可能性を示唆している。実用化を想定した場合、REA、RAの立場からは以下の事がいえる。Wada and Nishizawaは、一度使用したパラジウム電極は表面に亀裂や空洞が生じて再利用できなかつたと報告しており、重水素を吸収する物質は定期的な交換が必要になると思われる。したがって、REAの立場からは、吸収する物質の選択や更新頻度 (資源入手可能性・入手エネルギー) などの検討が必要になろう。当然のことながら、更新回数は発電所の設備利用率に直接影響を与える。また、吸収する物質は核融合反応からの中性子に直接晒されるから放射化すると考えられ、RAの立場からその誘導放射能を評価する必要がある。またD-D反応による実用化を目指すとなると、トリチウムの発生とその処理、構造材の誘導放射能などが同様に問題となる。さらに、D-T反応による実用化を目指すとするならば、トリチウム増殖のためのリチウムの使用、トリチウムの漏洩、誘導放射能の発生などの問題が生じることになる。

〔参考文献〕

- FLEISCHMANN, M. and PONS, S. (1989) Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. Vol.261, No.2A, 301-308.
- JONES, S.E. (1986) Muon-catalysed fusion revisited. *Nature*, Vol.321, 127-133.
- JONES, S.E. et al. (1989) Observation of cold nuclear fusion in condensed matter. *Nature*, Vol.338, 737-740.
- 永嶺謙忠 (1988) ミュオンが触媒する核融合. *科学*, Vol. 58, No. 7, 423-427.
- 永嶺謙忠 (1989) 学界ニュース: 低温核融合ワークショップ. *日本物理学会誌*, Vol. 44, No. 8, 615-618.
- RAFELSKI, J. and JONES, S.E. (1987) Cold Nuclear Fusion. *Scientific American*, Vol.257, No.1, 84-89.
- WADA, N. and NISHIZAWA, K. (1989) Nuclear Fusion in Solid. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.28, No.11, L2017-L2020.

参考論文  
題目

1. Environmental Management System for Rural Region - Case Study at Atsumi District, Central Japan.  
H. Fukui, K. Ando, T. Nagai, S. K. Kim and Y. Shimazu.  
Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ., Vol. 29, 55-80 (1981).  
(地方地域のための環境管理システム-渥美地方におけるケース・スタディ)
2. Science Assessment of Fusion Power Plant - (1) Resource Economy Assessment.  
Y. Shimazu and T. Nagai.  
Summaries of special research project on Nuclear Fusion supported by the Ministry of Education, 383-389 (1983).  
(核融合炉のサイエンス・アセスメント- (1) 資源・経済アセスメント)
3. 核融合炉のエネルギー分析.  
永井亨, 島津康男.  
文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究(核融合)「核融合炉のアセスメントに関する研究」, 核融合炉のアセスメント, 11-34 (1984).
4. 核融合炉のアセスメントに関するアンケートの集計と分析.  
島津康男, 永井亨.  
文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究(核融合)「核融合炉のアセスメントに関する研究」, 核融合炉のアセスメントⅡ, 1-20 (1984).
5. HIBLIC-Iのエネルギー分析.  
永井亨.  
核融合炉作業委員会報告「重イオン慣性核融合炉の基礎設計HIBLIC-IM」, 名古屋大学プラズマ研究所, 48-50 (1985).
6. Energy Analysis of HIF Reactor "HIBLIC-I".  
T. Nagai, H. Obayashi and T. Yamaki.  
Contribution paper to the Proceedings of International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion (Washington D.C., 1986), AIP Conference Proceedings, No. 152, 523-530 (1986).  
(重イオン慣性核融合炉「HIBLIC-I」のエネルギー分析)
7. Safety Analysis of Fusion System with Knowledge Base.  
T. Nagai.  
名古屋大学大型計算機センター研究開発部研究報告, No. 13, 41-48 (1987).  
(知識ベースを用いた核融合炉システムの安全解析)
8. В экологическом измерении.  
Л. Г. Мельник, Я. Шимадзу, Т. Урабэ, А. Хасегава, Х. Фукуи,  
Т. Нагаи.  
ЭНЕРГИЯ, No. 3, 16-21 (1988).  
(エコロジー計量経済に向けて)
9. 知識ベースを用いた核融合炉システムの異常連鎖シミュレータの試作.  
永井亨.  
名古屋大学大型計算機センター研究開発部研究報告, No. 14, 17-31 (1988).