

国・本館

# 高温超伝導バルク導体を用いた 超伝導限流変圧器の開発に関する研究

研究課題番号 (14205040)

平成 14 年度～平成 15 年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2))

研究成果報告書

平成 16 年 3 月

研究代表者 早川 直樹

(名古屋大学大学院工学研究科助教授)

## はしがき

本報告書は、平成 14 年度～15 年度の 2 年にわたって文部科学省科学研究費補助金補助金基盤研究(A)(2) (研究課題番号 14205040) の交付を受け、下記研究組織によって行った「高温超伝導バルク導体を用いた超伝導限流変圧器の開発に関する研究」の研究成果報告書である。

## 研究組織

研究代表者：早川 直樹 (名古屋大学大学院工学研究科助教授)

研究分担者：大久保 仁 (名古屋大学理工科学総合研究センター教授)

研究分担者：加藤 克巳 (名古屋大学大学院工学研究科助手)

研究分担者：Klaus-Peter Juengst (カールスルーエ研究センター  
技術物理研究室主任研究員)

研究協力者：Chatchaval Kurupakorn (名古屋大学大学院工学研究科学生)

## 交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	23,800	2,142	25,942
平成 15 年度	14,600	1,314	15,914
総計	38,400	3,456	41,856

## 研究発表

### [ I ] 学術論文誌

- (1) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁:「高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の開発」, 電気学会論文誌 B (投稿中)
- (2) C.Kurupakorn, N.Hayakawa, H.Okubo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noel, K.-P.Juengst: “Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with Bi2212 Bulk Coil”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity (to be published)

[ II ] 国際会議

- (3) C.Kurupakorn, N.Hayakawa, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noe, K.-P.Juengst, H.Okubo: “Recovery Characteristics after Current Limitation of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, Applied Superconductivity Conference (ASC) (to be presented)
- (4) C.Kurupakorn, N.Hayakawa, H.Okubo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noe, K.-P.Juengst: “Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with Bi2212 Bulk Coil”, 18th Int. Conf. on Magnet Technology (MT), 1B-a06 (2003)

[ III ] 研究会

- (5) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の限流動作・復帰特性」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, pp.7-12 (2004)
- (6) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の設計・製作・基礎特性」, 電気学会超電導応用電力機器／リニアドライブ合同研究会, pp.19-24 (2003)

[ IV ] その他の口頭発表

- (7) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「Bi-2212 バルク導体を用いた高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の限流特性」, 電気学会全国大会, No.5-017 (2004)
- (8) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の限流動作特性」, 電気関係学会東海支部連合大会, No.169 (2003)
- (9) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器(HTc-SFCLT)の基礎特性」, 電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.277-278 (2003)
- (10) クルパコン チャチャウァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「Bi2212 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作」, 電気学会全国大会, No.5-145 (2003)

## 目次

第1章 緒論	1
1. 1 超電導限流変圧器 (SFCLT) の開発意義	1
1. 2 超電導変圧器・限流器の研究開発動向	2
1. 2. 1 超電導変圧器	2
1. 2. 2 超電導限流器	5
1. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の開発	10
1. 4 高温超電導材料	15
1. 4. 1 YBCO 系材料	15
1. 4. 2 Bi 系材料	16
1. 4. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) に用いる材料	17
1. 5 本研究の目的および内容	18
【第1章の文献】	19
第2章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作	21
2. 1 まえがき	21
2. 2 高温超電導限流変圧器の設計仕様および設計手順	21
2. 3 高温超電導限流変圧器の構造	23
2. 3. 1 Bi2212/CuNi 複合導体	23
2. 3. 2 鉄心	27
2. 3. 3 高温超電導限流変圧器の組み立て	27
2. 3. 4 漏れインピーダンスおよび限流インピーダンス	32
2. 4 まとめ	33
【第2章の文献】	34

第3章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の基礎特性試験.....	35
3. 1 まえがき.....	35
3. 2 Bi2212/CuNi 複合導体の通電特性.....	35
3. 2. 1 直流臨界電流.....	35
3. 2. 2 交流通電特性.....	37
3. 3 無負荷試験および短絡試験.....	42
3. 3. 1 無負荷試験.....	42
3. 3. 2 短絡試験.....	49
3. 4 まとめ.....	52
 第4章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の限流動作・ 超電導復帰特性試験.....	 53
4. 1 まえがき.....	53
4. 2 HTc-SFCLT の限流動作特性試験.....	53
4. 3 HTc-SFCLT の超電導復帰特性試験.....	60
4. 4 まとめ.....	68
 第5章 総括.....	 69
5. 1 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT).....	69
5. 2 本研究で得られた成果および知見.....	69
5. 2. 1 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作.....	69
5. 2. 2 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の基礎特性試験.....	70
5. 2. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の限流動作・ 超電導復帰特性試験.....	 71

# 第1章 緒論

## 1. 1 超電導限流変圧器 (SFCLT) の開発意義

次世代の高性能・高機能・環境低負荷型電力機器として、各種の超電導電力機器の研究開発が行われている。これらは超電導電力機器単体としての機能追求に主眼が置かれているのに対して、超電導電力機器と背後電力システムとの構成・運用上の協調（システムコーディネーション）の観点から、超電導電力機器に対するシステムの考察が求められている。このような超電導電力機器開発におけるシステムの指向の一環として、超電導変圧器に限流機能を複合化した「超電導限流変圧器（Superconducting Fault Current Limiting Transformer: SFCLT）」が提案された<sup>[1-5]</sup>。SFCLT は通常の運転状態では超電導変圧器として機能し、故障電流などの過電流が流れた場合には超電導変圧器巻線を積極的にクエンチさせ、抵抗型超電導限流器としての機能が付加されるという複合多機能型の超電導電力機器である。

SFCLT のコンセプトは、変圧器の漏れインピーダンスが電力システムにおいて既に故障電流の抑制機能を有しているという点に着目して発想された。すなわち、超電導変圧器に限流機能を付加することにより、電力システムにおける定態安定度の向上（変圧器としての漏れインピーダンスの低減効果）、過渡安定度の向上（限流器としての故障電流の抑制効果）および両者の両立を図るというものである。SFCLT の開発により、機器単体としての高効率化・小型化という従来のメリットに加え、機器の複合多機能化による電力システム全体としての構成・運用の合理化・高信頼度化という新しいメリットの創成が期待される。

## 1. 2 超電導変圧器・超電導限流器の研究開発動向

ここでは、SFCLTの原理的構成要素である超電導変圧器と超電導限流器について、高温超電導導体（High Tc Superconductor: HTS）を用いた最近の研究開発動向を概観する。

### 1. 2. 1 超電導変圧器

Table1.1にHTS変圧器の研究開発動向を示す。国内では、九州大学／富士電機／住友電工のグループが単相500kVA、6.6kV/3.3kVのHTS変圧器を製作し、77Kの大気圧沸騰状態の液体窒素に浸漬して負荷試験を行っている<sup>[6]</sup>。また、66Kの過冷却状態において、容量が800kVAに達することを確認した。1次巻線および2次巻線には、Bi2223銀シース多芯線を素線とした転位導体が用いられている。HTS変圧器の損失（交流損失、侵入熱、鉄損など）を測定し、冷却ペナルティを1/20としてHTS変圧器としての効率を評価した結果、500kVA(77K)で99.1%、800kVA(66K)で99.3%となり、同等容量の従来器と比較して効率が向上していることを明らかにした。さらに、過冷却液体窒素冷却システムを付加した単相1MVA、22kV/6.9kVのHTS変圧器を開発し、電力系統への導入試験に成功した<sup>[7,8]</sup>。その諸元および外観をTable1.2およびFig.1.1にそれぞれ示す。

海外では、ABB／ASC／EDFのグループが三相630kVA、18.7kV/420VのHTS変圧器を製作し、1997年3月にジュネーブ近郊の実系統に導入され、1998年2月まで1年間運転された<sup>[9]</sup>。このHTS変圧器は「研究室の壁」を破って実系統に導入された最初のHTS変圧器として位置づけられている。この結果に基づいて、後継プロジェクトとして三相10MVA、63kV/22kVのHTS変圧器を開発し、2002年に実系統に導入することが計画されたが、超電導線材の低損失化が不十分であったことなどから、現在は計画が中断されている段階である。ドイツでは、Siemensが1MVA、25kV/1389Vの車両用HTS変圧器を開発している<sup>[10,11]</sup>。

Table 1.1 Major efforts for HTS transformer development

Country	Organization	Material	Specifications		Reference	Year
			Voltage	Power rating		
Japan	Kyushu University Fuji Electric Corporate Research Sumitomo Electric Industries	Bi 2223	6.6 kV/3.3 kV 22 kV/6.9 kV	500 kVA 1 MVA	(6) (7,8)	1997 2001
Switzerland United States France	ABB ASC EdF	Bi 2223	18.7 kV/420 V	630 kVA	(9)	1998
Germany	Siemens	Bi 2223	25 kV/1389 V	1 MVA	(10,11)	2002
United States	Waukesha Electric Systems IGC/APD Cryogenics	Bi 2212	13.8 kV/6.9 kV 24.9 kV/4.2 kV 66 kV/12 kV	1 MVA 5 MVA 30 MVA	(12,13)	1999 2002 2002
Korea	EESRI Korea Polytechnic University Seoul National University Hyosung Corporation	Bi2223	22.9 kV/6.6 kV	1 MVA	(14)	2003

Table 1.2 Design parameters of 1MVA HTS transformer [7]

Parameters	Design values
Capacity	1 MVA
Primary/Secondary voltage	22 kV / 6.9 kV
Primary/Secondary current	45.4 A / 145 A
Winding type	Cylindrical / cylindrical
Layer number	4 / 2
1-turn voltage	39.3 V / 39.2 V
Operation temperature	77 K
Frequency	60 Hz
Magnetic induction in core	1.6 T (room temperature)
% impedance	5.0 %
Coolant	Liquid nitrogen
Strand	Bi-2223 multifilamentary tape
Twist pitch of strand	No twist
Matrix of strand	Mn-Ag
Strand number in winding	2 / 6
Conductor type	Transposed parallel conductor
Maximum level of over-current	5 times as large as rated level
AC withstand voltage	50 kV rms
Lightning impulse voltage	100 kV peak

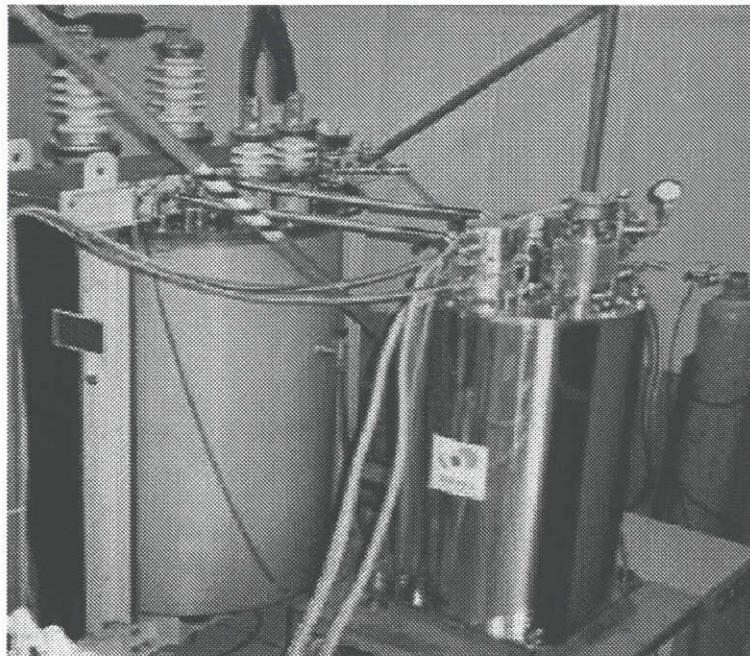


Fig. 1.1 800kA class 22kV/6.9kV 3phase HTS transformer [8]

米国では、Waukesha Electric Systems/Intermagetics General Corporation (IGC) /Oak Ridge National Laboratory (ORNL)/Rochester Gas & Electric のグループが単相 1MVA, 13.8kV/6.9kV の冷凍機冷却 HTS 変圧器を開発し、25K において 0.675MVA (二次側 4.5kV, 150A) の負荷試験を実施した<sup>[12,13]</sup>。この結果に基づいて、第 2 フェーズとして三相 5MVA, 24.9kV/4.2kV の HTS 変圧器を開発し、2002 年末から 2003 年まで各種試験が実施される予定である。さらに、第 3 フェーズとして三相 30MVA, 66kV/12kV の HTS 変圧器を開発する計画がある。

韓国では、国家のプロジェクト DAPAS-Project1 により、1MVA, 22.9kV/6.6kV の HTS 変圧器が設計・製作された。1 次巻線および 2 次巻線には、Bi2223 テープが用いられており、形状はダブルパンケーキ形である。現時点では 77K 大気窒素温度における冷却であるが、最終的には過冷却液体窒素冷却システム(65K) を付加する予定である<sup>[14]</sup>。

## 1. 2. 2 超電導限流器

Table1.3 に HTS 限流器の研究開発動向を示す。同表からわかるように、HTS 限流器の方式としては、コンパクト化・低コスト化が可能な抵抗型が主流になりつつある。以下では、抵抗型を中心として、各種の HTS 限流器に関する研究開発動向を示す。

### (a) 抵抗型

国内では、東芝/Super-GM のグループが幅 18mm, 長さ 100mm の LaAlO<sub>3</sub> 基板上に厚さ 1 $\mu$ m の YBCO および 100nm の銀を蒸着した限流素子を開発し、規約短絡電流 800A<sub>peak</sub> を 200A<sub>peak</sub> まで限流した<sup>[15]</sup>。また、国家プロジェクトとして、Super-ACE (R&D of fundamental technologies for superconducting AC power equipment) が 2000 年から開始され、2004 年に 200V/1kA および 6.6kV/100A, 2009 年に 6.6kV/2kA の YBCO 薄膜 HTS 限流器を開発する予定である<sup>[16]</sup>。

イギリスでは、1999 年に Rolls Royce/EA Technology のグループが 11kV 配電

Table 1.3 Major efforts for HTS fault current limiter development

Country	Organization	Type	Specifications				Reference	Year	
			Material	Voltage	Current	Fault Current ( $I_{pro}/I_{limit}$ )			
Japan	Toshiba Super-GM	Resistive	YBCO	200 V	70 A	800 A/200 A	(15)	2001	
	Toshiba Mitsubishi Super-GM		YBCO	6.6 kV 200 V	100 A 1 kA	—————	(16)	2002	
United Kingdom	Rolls Royce EA Technology		Bi2212	11 kV	400 A	37 kA/12 kA	(17)	1999	
France	Schneider Electric CNRS		Bi2223	1.1 kV	750 A	5 kA/1.1 kA	(18)	1999	
Germany	Siemens		YBCO	765 V	135 A	670 A/110 A	(19)	1999	
	FZK		Bi2212	10 kV	1 kA	10 kA/6 kA	(20,21)	2002	
	Nexans		Bi2212	2 kV	600 A	17 kA/8 kA	(22)	2003	
Switzerland	ABB		Bi2212	8 kV	800 A	16 kA/2.2 kA	(23)	2002	
Switzerland	ABB		Shielded core	Bi2212	10.5 kV	70 A	60 kA/700 A	(24)	1997
				Bi2212	8.3 kV	200 A	13.2 kA/4.3 kA	(25)	1999
Canada	Hydro Quebec	Bi2212		600 V	175 A	2.5 kA/2 kA	(26)	1999	
Japan	Toshiba TEPCO	Rectifier bridge	Bi2223	6.6 kV	36 A	12.5 kA/1.3 kA	(27)	2001	
Japan	Toshiba TEPCO Super-GM		Bi2223	66 kV	375 A	—————	(28)	2003	
Korea	Yonsei University		Bi2223	6.6 kV	200 A	—————	(28)	2003	
United States	GA		Bi2223	12.5 kV	1200 A	20 kA/4 kA	(29)	2000	

系統用 7.5MVA 限流器を開発した。線材は Bi2212 バルクであり、 $400A_{peak}$  において抵抗が発生し、限流・復帰動作を確認した<sup>[17]</sup>。フランスでは、Schneider Electric/CNRS のグループが Bi2223 棒を用いた限流器を製作し、 $5kA_{peak}$  の故障電流を  $1.1kA_{peak}$  まで限流した<sup>[18]</sup>。ドイツでは、Siemens/Friedrich-Alexander 大学のグループが直径 4 インチのサファイア基板上に 250nm 厚の YBCO 薄膜限流素子を開発し、 $100kVA$ ,  $765V_{rms}/135A_{rms}$  を達成した<sup>[19]</sup>。後継プロジェクトとして、 $20cm \times 20cm$  の要素素子に  $1.2\mu m$  厚の YBCO 薄膜を蒸着した限流器を試作し、三相  $1.2MVA$ ,  $7.2kV/100A$  の試験に成功した。また、FZK を中心とする国家プロジェクトとして、三相  $13.8MVA$ ,  $10kV/800A$  の HTS 限流器が開発され、Melt Cast Processed (MCP)法によって製作した Bi2212 バルクバイファイラコイルが  $17kA_{peak}$  の故障電流を  $7.7kA_{peak}$  まで限流した<sup>[20,21]</sup>。Bi2212 コイルの諸元、外観、限流時の電圧・電流波形を Table1.4, Fig.1.2 および Fig.1.3 にそれぞれ示す。さらに、Nexans が製作した限流素子は高さ 300mm、直径 58mm のバルク超電導体の円筒に切れ目を入れて長さ 540mm のバイファイラコイルにした SN 転移型であり、高温超電導体を用いた限流素子としては世界最大のものである。9 個のコイルを直列にすると、定格電流・電圧は  $600A \cdot 2kV$  となり、予想短絡電流  $17kA$  の短絡試験で  $8kA$  以下への限流に成功している<sup>[22]</sup>。

スイスでは、ABB が Bi2212 バルク導体を用いて  $6.4MVA$ ,  $8kV/800A$  の実証器を開発した。Bi2212 バルクは  $30cm \times 40cm$  のミアンダ状であり、補強のための FRP 板とバイパス抵抗としてのステンレス鋼板でサンドイッチにした構造である<sup>[23]</sup>。Fig.1.4 に外観を示す。 $6.4MVA$  という容量は、 $77K$  で動作する HTS 限流器としては現時点における世界最高値である。

#### (b) 磁気遮蔽型

スイスでは、ABB が三相、 $10.5kV/70A$  の HTS 限流器を試作して実系統に導入し、1 年間の長期試験を行った<sup>[24]</sup>。各相の磁気遮蔽用円筒 HTS 導体は直径 380mm の Bi2212 焼き付けリングを 16 個積み重ねたものである。また、後継プ

Table 1.4 Design parameters of MCP Bi2212 coil <sup>[20]</sup>

Quantity	Value
Conductor length	5.4 m
Sc cross-section	0.24 cm <sup>2</sup>
Critical current (77K)	290 A
Critical current (65K)	850 A
Room temperature resistance	120 mΩ
Contact resistance	< 1 μΩ
Max. electrical field	0.56 V/cm
Rated power (65K)	> 100 kVA

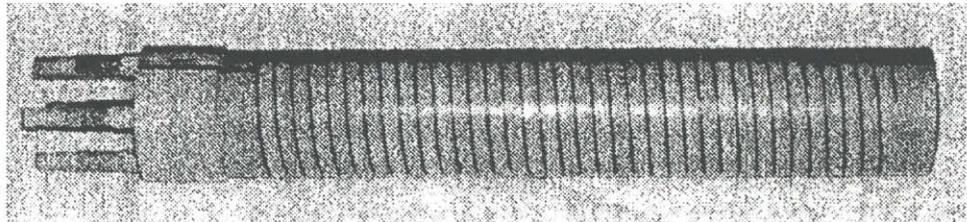


Fig.1.2 MCP Bi2212 coil <sup>[20]</sup>

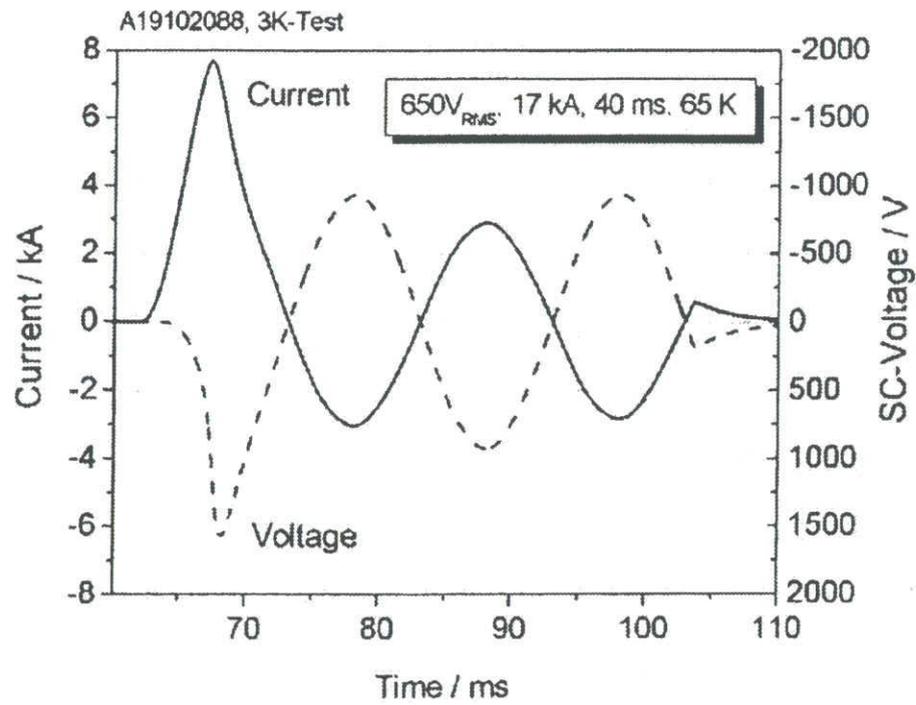


Fig.1.3 Waveform of short circuit current [20]

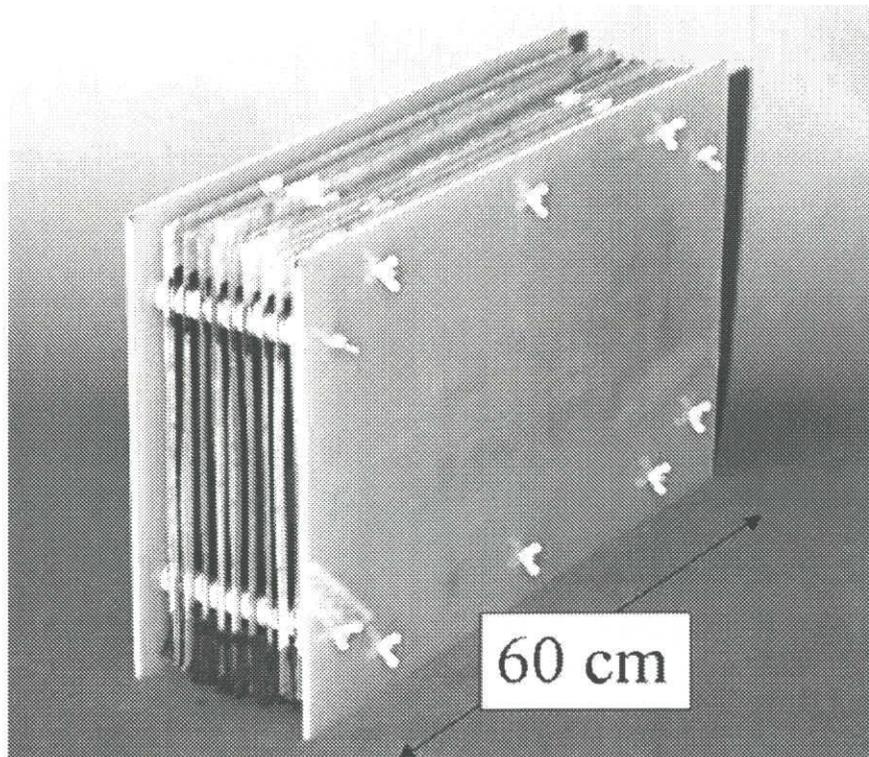


Fig.1.4 Bi 2212 bulk HTS fault current limiter [23]

(6.4MVA, 8kV/800A)

プロジェクトとして、単相 1.6MVA, 8.3kV/200A の HTS 限流器を製作し、 $13200A_{\text{peak}}$  の故障電流を  $4300A_{\text{peak}}$  まで限流した<sup>[25]</sup>。カナダでは、Hydro Quebec が Bi2212 円筒を用いた HTS 限流器を開発し、100kVA を達成した<sup>[26]</sup>。

### (c) 整流型

国内では、東芝／東京電力のグループが Ag/Mn シース Bi2223 を用いた単相 6.6kV 器を製作し、 $12.5kA_{\text{peak}}$  の故障電流を  $1.3kA_{\text{peak}}$  に限流した<sup>[27]</sup>。また、Super-ACE の東芝／東京電力／Super-GM は 66kV/375A モデルを構築し、冷却、絶縁、通電試験を成功させた<sup>[28]</sup>。韓国では、最終的に 154kV/2kA 器をターゲットとするが、現時点では、6.6kV/200A, 3 相モデルの限流試験が成功した<sup>[28]</sup>。米国では、General Atomics (GA)／IGC／Los Alamos National Laboratory (LANL)などのグループが世界最大級の Bi2223 コイルを用いた単相 2.4kV/80A 器を製作し、限流試験に成功した<sup>[29]</sup>。

## 1. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の開発

前節で示したように、世界各地で超電導変圧器および超電導限流器の開発が行われている。しかしながら、超電導電力応用技術の実現のためには、変圧器、限流器などといった機器単体としてのコンポーネント開発だけでなく、実運用を考慮しての電力システムとの協調を考慮した機器開発を行う必要がある。また、超電導電力システム全体の効率向上を図るためには、従来の電力機器にはない新しい機能・概念の創造および機器の統合などによる多機能化が求められる。したがって、本研究では、変圧器巻線のクエンチを積極的に利用することによって限流機能を持たせる「超電導限流変圧器 (Superconducting Fault Current Limiting Transformer : SFCLT)」を提案し、実証的に研究を進めている。これまでの SFCLT 開発は以下のとおりである。

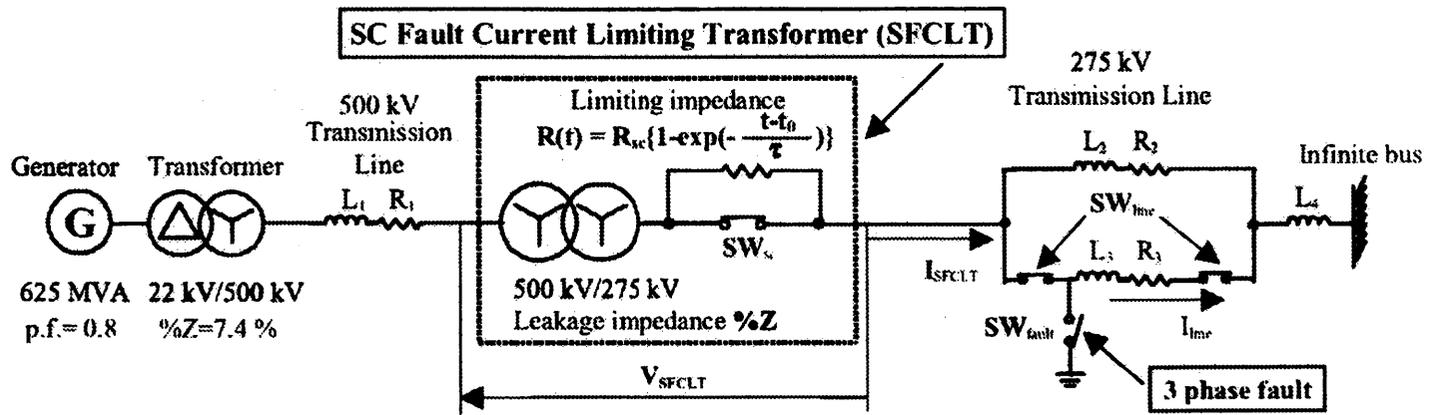
超電導限流変圧器 (SFCLT) の技術的可能性と電力システム導入効果を検証するために、SFCLT を超高压送電システムに導入することを想定して Fig.1.5 に示すモデルシステムを構築し、EMTP (汎用電磁過渡解析プログラム) による動作シミュレーションを行った。その結果、超電導変圧器が限流機能を持つことによって漏れインピーダンスを低減することができ、電力システムの定態安定度向上に寄与することを定量的に示した。また、系統故障時の電力動揺を解析した結果、SFCLT の漏れインピーダンスと限流インピーダンスとの最適化により、電力システムの過渡安定度向上にも貢献することを指摘した<sup>[1-3]</sup>。

さらに、動作シミュレーションによって最適化したパラメータに基づいて、NbTi 交流用超電導線を用いた液体ヘリウム冷却レベルの LTc-SFCLT (三相、6.25kVA, 275V/105V) を設計・製作し、機器単体および系統シミュレータに組み込んだシステムとしての動作試験を行った。その結果、SFCLT の漏れインピーダンス、限流動作開始電流値、限流インピーダンスの立ち上がり時定数、最終到達インピーダンス等に関する設計仕様を満たしていることを確認した<sup>[4,5]</sup>。

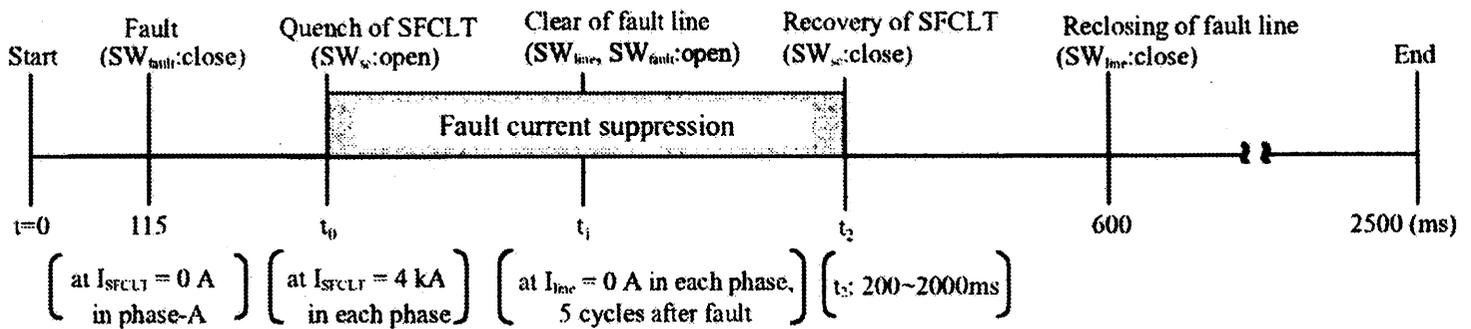
LTc-SFCLT の外観および限流波形を Fig.1.6 および Fig.1.7 に示す。以上の解析・実験結果より、SFCLT の技術的可能性と電力システム導入効果を基礎的に実証することができた。一方、LTc-SFCLT の技術課題として、

- 1) 経済性の冷却システムコスト
- 2) 熱的安定度：LTc-SFCLT を運転温度 (液体ヘリウム温度) まで冷却すると導体の比熱は常温時よりも 3 桁程度小さくなりわずかな熱擾乱で容易に気泡が発生し、絶縁破壊電圧の低下が起きる。
- 3) 超電導復帰特性：LTc-SFCLT は液体ヘリウム温度領域で運転され、熱的溫度上昇の許容できる範囲が小さいので、NbTi 超電導体のクエンチ・限流動作後の超電導復帰特性が懸念されている。

以上の技術的な課題は、高温超電導導体を用いることにより、相当な部分が克服されるものと期待される。すなわち、LTc-SFCLT 開発における研究成果を踏まえて、液体窒素冷却レベルで高温超電導導体の優れた超電導復帰特性を活

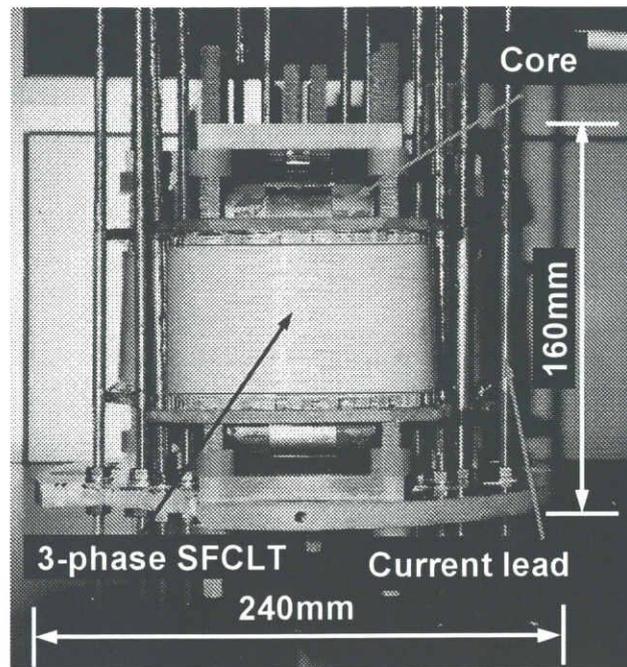


(a) 500 kV/275 kV model system

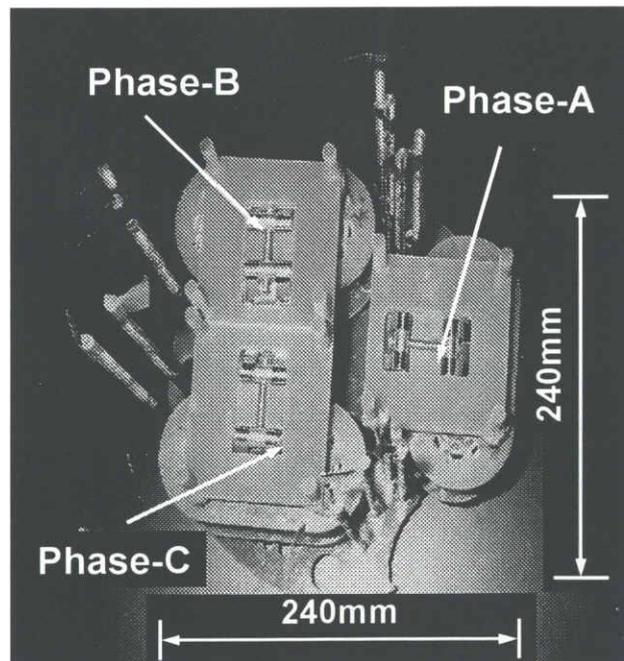


(b) Switching operation and time sequence after fault

Fig.1.5 Model system and switching operation scheme in EMTP analysis for SFCLT<sup>[5]</sup>

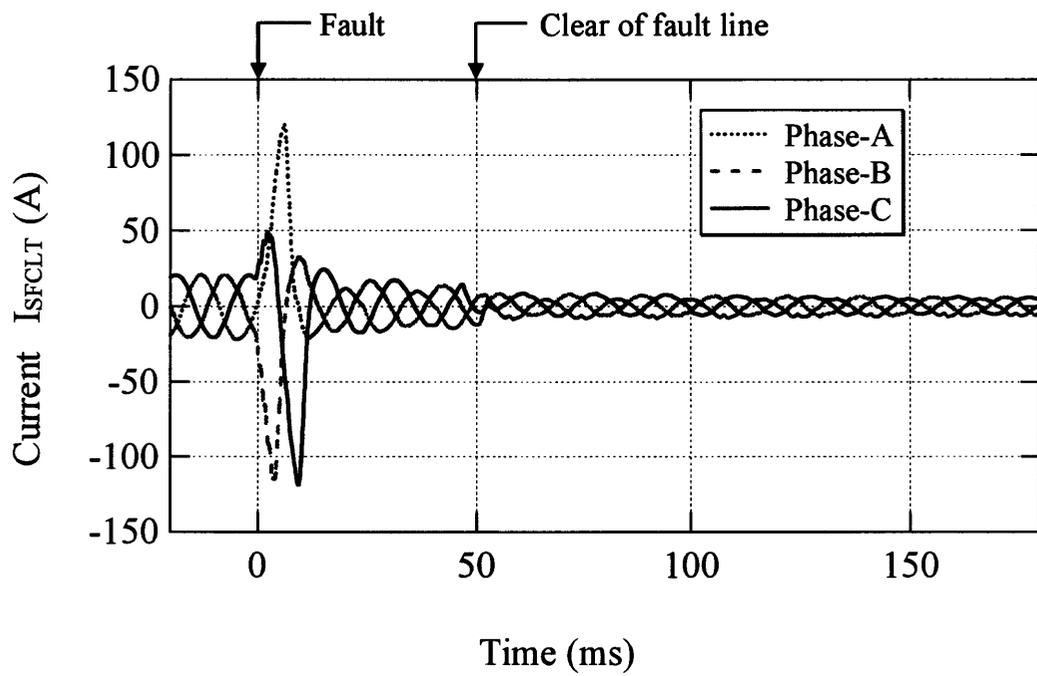


(a) Side view

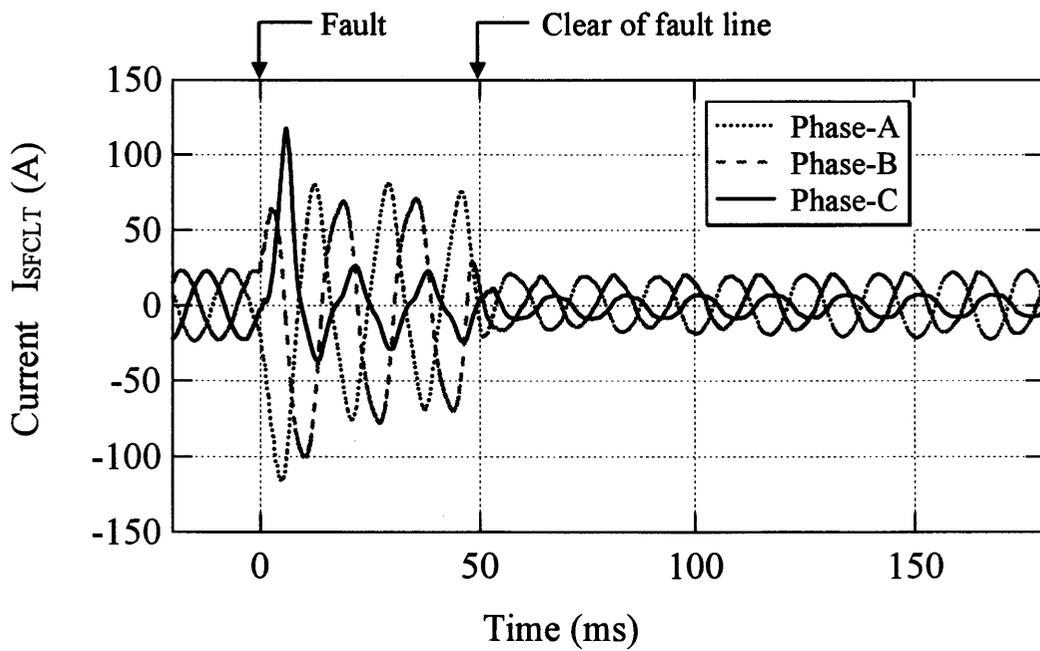


(b) Top view

Fig.1.6 3-phase, 275 V/105 V LTc-SFCL<sup>[5]</sup>



(a) Case 1 : Phase-A,B,C quench



(b) Case 2 : Phase-C quench

Fig. 1.7 Current and voltage waveforms at limiting operation of LTc-SFCLT

用する高温超電導限流変圧器（HTc-SFCLT）を発展的に開発することにより、冷却コスト・熱的安定度・超電導復帰特性に関する技術課題を克服するとともに、SFCLTの実現に向けて大きく前進することが考えられる。

## 1. 4 高温超電導材料

銅酸化物が発見されて以来、高温超電導化への数多くの研究が世界中で行われている。さらに、より高い電流密度やより高い臨界温度などを目指して、超電導材料研究が盛んに行われている。現在、開発が進められている高温超電導体は、大きく分けて、イットリウム系（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO)) およびビスマス系（Bi系）の2種類がある。

### 1. 4. 1 YBCO系材料

YBCOはBi系材料に比べて液体窒素温度における不可逆磁界が高いため、77Kにおいて磁界中で臨界電流密度の低下が少ないという特徴があり、Bi系銀シー線材の磁界特性の欠点を克服することが期待されている。しかしながら、YBCO超電導体では結晶粒界を渡って電流が流れにくい性質があるため、結晶格子軸の向きが揃っていないと臨界電流特性が急激に低下することが大きな問題であった。このため線材化にあっては結晶粒を三次元的に配向制御する技術開発が進められている。YBCO超電導層を結晶配向させるために、大きくは無配向の金属基板上に結晶配向した中間層を設ける方法（中間層配向制御型）および、下地となる金属基板そのものを配向させる方法（基板配向制御型）により開発が進められている。

## 1. 4. 2 Bi 系材料

### (a) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi2223) 材料

Bi 系高温超電導体は、臨界温度  $T_c$  が液体窒素温度を超える相として、 $T_c = 85\text{K}$  の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$  (Bi2212)相と  $T_c = 110\text{K}$  の  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi2223)相の 2 相がある。Bi2223 は Bi2212 に比べて  $T_c$  が 20K 以上高いため、幅広い温度での利用が可能である。ただし、液体窒素温度領域では、ピンニング力が弱いため現状では低磁界応用に限定される。数 T 以上の磁界応用を考慮すると温度を下げて利用する必要がある。また、結晶構造に依存した異方性を有することから、線材の  $J_c$  特性を任意磁界、任意の磁界印加方向の条件で知る必要がある。

Bi2223 線材の一般的な作成法は銀被覆法 (Powder In Tube method, PIT) である。銀パイプに Bi2223 の原料を充填し、伸線加工を施した後、これらを複合本銀パイプにかん合し、伸線加工や圧延加工を施し目的の形状が得られる。

### (b) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ (Bi2212) 材料

Bi2212 は 75~93K 程度の超電導相移転温度を持ち、特に、極低温中においては臨界磁界が非常に高く、磁界による臨界電流密度の低下がほとんど起きないという優れた特徴が報告されている<sup>[30]</sup>。作製方法としては、一般に、Bi2223 線材と同じ銀被覆法 (Powder In Tube method, PIT) である。また、電力機器への応用を考慮して Bi2212 バルク導体の開発が進められている。バルク超電導体は酸化物超電導体を塊のまま応用に供する目的で開発され、強いピンニング力を持つため磁石応用に適用している。さらに、バルク超電導体は熱伝導率が低いため外部から超電導機器への熱流入を抑えることができるという利点で超電導マグネットの電流リードとして開発が期待されている。

### 1. 4. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) に用いる材料

HTc-SFCLT では、過電流による超電導変圧器巻線のクエンチを積極的に限流機能として利用することが目的であり、変圧器巻線は同時に限流巻線とする。すなわち、超電導変圧器としての超電導巻線が必要である。前節に述べたように YBCO 系の材料が異方性を持つため、主な作製プロセスとしては蒸発方法で限られており、長尺線材の加工が困難である。また、現在、Bi2223 の長尺線材が作製加工から得られたが、銀バイパスを用いるため、十分な抵抗が得られていない。さらに、線材に銀マトリクスがあるため、経済的なコストおよび交流損失といった問題点が挙げられる。

これらの理由から、Table 1.3 に示すように、超電導限流器抵抗型には Bi2212 材料がよく用いられることがわかる。本研究においては上記に基づいて実績がある Melt Cast Processed (MCP)法による MCP-Bi2212 バルク導体<sup>[20-21]</sup>を選定し、HTc-SFCLT の低圧側コイルとした。MCP-Bi2212 バルク導体は通電電流レベル、交流損失およびクエンチ時の導体内発生電界などの点において、超電導限流器用導体として適用可能な特性を有している。同バルク導体をバイファイラコイル形状に切削加工した抵抗型超電導限流器が開発されており、77K および 65K において優れた通電・限流特性を示すことが報告されている<sup>[31]</sup>。HTc-SFCLT では、この MCP-Bi2212 バルク導体をモノファイラコイル形状とすることによって変圧器巻線とし、過電流通電時には限流器巻線としても機能することを意図している。

### 1. 5 本研究の目的および内容

以上のような背景および研究経緯により、本研究では、液体窒素冷却レベルの高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) を開発することを目的とする。高温超電導導体としては、Nexans (ドイツ) が抵抗型 HTS 限流器用素子として開発し

た MCP-Bi2212 バルクバイファイラコイル<sup>[20,21]</sup>の製作技術に基づいて通電・限流特性および超電導復帰特性に優れた HTc-SFCLT 用モノファイラコイルを設計・製作した。製作したコイルを用いて、HTc-SFCLT を組立てて、HTc-SFCLT の変圧器としての基礎特性試験および限流器としての限流動作・超電導復帰特性試験を行った。

本論文は 5 章からなり、第 2 章以降の概要は以下の通りである。

第 2 章では、HTc-SFCLT を設計・製作した。設計仕様は LTc-SFCLT（三相、6.25kVA、275V/105V）と同一であり、ここでは単相分として定格電圧：159V/61V の HTc-SFCLT を設計・製作した。

第 3 章では、HTc-SFCLT の基礎特性試験を実施した。MCP-Bi2212 バルクモノファイラコイル単体としての直流・交流通電特性を取得するとともに、HTS 変圧器としての無負荷試験および短絡試験を通じて巻数比と漏れインピーダンスが設計仕様を満たしていることを確認した。

第 4 章では、HTc-SFCLT の限流器としての特性を実験的に検証した。また、HTc-SFCLT の超電導復帰特性試験を行い、限流動作中の注入パワー・蓄積熱エネルギー・温度上昇について検討した。

第 5 章では、本研究で得られた知見をまとめ、総括とした。

## 【第1章の文献】

- [1] N.Hayakawa, et al: "Feasibility Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT)", *Cryogenics*, Vol.40, pp.325-331 (2000)
- [2] N.Hayakawa, et al: "A System Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Function of Fault Current Suppression and System Stability Improvement", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.1936-1939 (2001)
- [3] 加川, 他: 「超電導限流変圧器の動作特性と電力システムへの導入効果」, *電気学会論文誌 B*, 121 巻 11 号, pp.1572-1578 (2001)
- [4] H.Kagawa, et al: "Experimental Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) for Fault Current Suppression and System Stability Improvement", *Physica C*, Vol.372-376, Part III, pp.1706-1710 (2002)
- [5] H.Okubo et al: "Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Functions of Fault Current Suppression and System Stability Improvement", *IEEE PES T&D*, Vol.1, pp.301-306 (2002)
- [6] K.Funaki, et al: "Preliminary Tests of A 500kVA-Class Oxide Superconducting Transformer Cooled by Subcooled Nitrogen", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.7, No.2, pp.824-827 (1997)
- [7] K.Funaki, et al: "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power Transformer", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.1578-1581 (2001)
- [8] H.Kimura, et al: "Test results of a HTS power transformer connected to a power grid", *Physica C*, 372-376, pp.1694-1697 (2002)
- [9] H.Zueger: "630kVA High Temperature Superconducting Transformer", *Cryogenics*, Vol.38, No.11, pp.1169-1172 (1998)
- [10] R.Schlosser, et al: "Development of High-Temperature Superconducting Transformers for Railway Applications", *ASC2002*, 2LM01 (2002)
- [11] M.Meinert, et al: "System Test of a 1-MVA-HTS-Transformer Connected to a Converter-Fed Drive for Rail Vehicles", *ASC2002*, 2LM08 (2002)
- [12] S.W.Schwenterly, et al: "Performance of a 1-MVA HTS Demonstration Transformer", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.9, No.2, pp.680-680 (1999)
- [13] S.W.Schwenterly, et al: "Development of HTS power transformers for the 21<sup>st</sup> century: Waukesha Electric Systems/IGC-Superpower/RG&E/ORNL SPI collaboration", *Physica C*, 382, pp.1-6 (2002)
- [14] W.S.Kim, et al: "Characteristics Test of a 1 MVA Single Phase HTS Transformer with Pancake Windings", *The 18<sup>th</sup> International Conference on Magnet Technology*, 1B-a07 (2003)
- [15] M.Takasaki, et al: "Performance Verification of a Practical Fault Current Limiter Using YBCO thin films", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.2499-2502 (2001)
- [16] K.Ueda, et al: "Research and development of super-conductive cable and AC power equipment", *Physica C*, 378 -381, pp.1158-1167 (2002)

- [17] K.Tekletsadir, et al: "Development of a 7.5MVA Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.672-675 (1999)
- [18] J.Noudem, et al: "Current Limitation at 1080A under 1100V with Bulk Bi2223", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.664-667 (1999)
- [19] B.Gromoll, et al: "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films-100kVA Functional Model", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.656-659 (1999)
- [20] M.Noë, et al: "Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters", ASC2002, 2LA02 (2002)
- [21] S.Elschner, et al: "Manufacturing and Testing of MCP 2212 bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter", ASC2002, 2LA03 (2002)
- [22] 低温工学, Vol.38, No.11, pp.59-66 (2003)
- [23] M.Chen, et al: "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi2212 superconductor ", Physica C, 372-376, pp.1657-1663 (2002)
- [24] W.Paul, et al: "Superconducting Control for Surge Currents ", IEEE Spectrum, Vol.35, No.5, pp.49-54 (1998)
- [25] E.M.Leung, et al: "Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Power Engineering Review, pp.15-18, August 2000
- [26] J.Cave, et al: "Development of Inductive Fault Current Limiters Up to 100kVA Class Using Bulk HTS Materials", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.9, No.2, pp.1335-1338 (1999)
- [27] T.Yazawa, et al: "Design and Test Results of 6.6kV High-Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.2511-2514 (2001)
- [28] 低温工学, Vol.38, No.12, pp.44-48 (2003)
- [29] E.Leung, et al: "Design & Development of a 15kV,20kA HTS Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp.832-835 (2000)
- [30] 技術開発ニュース, Vol.91, No.7, pp.7-8 (2001)
- [31] M.Noë, et al: "Investigation of high-Tc bulk material for its use in resistive superconducting fault current limiters", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.11, No.1, pp.1960-1963 (2001)
- [32] 電気学会:「電力系統における超電導機器-ハードウェアとソフトウェアの開発状況-」  
電気学会技術報告, 第 800 号, pp.23-25 (2000)
- [33] 塚本, 他:「Melt-Casting 法を用いて作製した Bi2212 バルク超電導体の導電特性」, 電気学会論文誌 B, 121 巻 10 号, pp.1257-1261 (2001)
- [34] 応用物理, Vol.73, No.1, pp.3-13 (2004)

## 第2章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作

### 2. 1 まえがき

本研究では、以下のステップによって超電導限流変圧器 (SFCLT) の開発を進めてきた。

PHASE-1 : EMTP (汎用電磁過渡解析プログラム) による SFCLT の電力システム導入効果の解析・評価,

PHASE-2 : NbTi を用いた液体ヘリウム冷却レベルの低温超電導限流変圧器 (LTc-SFCLT) の設計・製作・試験

PHASE-3 : 高温超電導導体を用いた液体窒素冷却レベルの高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作・試験

PHASE-1 では SFCLT を 500kV 基幹送電システムに導入した場合を想定して EMTP 解析を行い、SFCLT 動作パラメータを最適化した<sup>[1-3]</sup>。この結果に基づいて、

PHASE-2 において、三相、6.25kVA、275V/105V の設計定格を有する LTc-SFCLT を開発し、基礎的な動作特性を取得した<sup>[4,5]</sup>。

以上のようなステップを経て、本研究では、SFCLT 開発の PHASE-3 として HTc-SFCLT を設計・製作し、動作特性を取得する。本章では、設計・製作した HTc-SFCLT の概要について述べる。

### 2. 2 高温超電導限流変圧器の設計仕様および設計手順

HTc-SFCLT の設計仕様を Table 2.1 に示す。同表には、PHASE-1 における EMTP 解析に基づく SFCLT の最適設計パラメータ、PHASE-2 における LTc-SFCLT の設計仕様を併記している。同表に示すように、HTc-SFCLT の設計定格は

Table 2.1 Design parameters of SFCLT

Item		Design value	LTc-SFCLT	HTc-SFCLT
Phase		3	3	3
Frequency		60Hz	60Hz	60Hz
Rated voltage		275/105V	275/105V	275/105V
Leakage impedance		10.2%	9.36 % (A) 9.13 % (B) 8.80 % (C)	5-10 %
Material	LV	/	NbTi	Bi2212/CuNi
	HV		NbTi	Copper
I <sub>c</sub>		120 A	130 A (A) 110 A (B) 100 A (C)	57-78 A
Limiting resistance		125 % ( 2.2Ω )	117 % (2.1Ω) (A) 154 % (2.7Ω) (B) 188 % (3.3Ω) (C)	145 % (2.56Ω ) ( Expected )

LTc-SFCLT と同一（三相，6.25kVA，275V/105V）とし，単相分として定格電圧：159V/61V の HTc-SFCLT を製作することとした．また，低圧側コイルは Bi2212/CuNi 複合導体，高圧側コイルは銅線というハイブリッド構成であり，鉄心とともに液体窒素に浸漬冷却するタイプである．なお，変圧器としての漏れインピーダンスおよび限流器としての限流インピーダンスの設計値については，2.3.4 節において後述する．

HTc-SFCLT の設計手順を Fig.2.1 に示す．同図に示すように，1 次パラメータを鉄心磁束密度，2 次パラメータを低圧側コイルのターン数，3 次パラメータを低圧側コイルと高圧側コイルとのギャップ長とし，既存のクライオスタットに収納するための寸法制約（高さ<700mm，幅<250mm）を満たすとともに，漏れインピーダンスが 5~10%となるように設計を行った．

## 2. 3 高温超電導限流変圧器の構造

### 2. 3. 1 Bi2212/CuNi 複合導体

HTc-SFCLT の低圧側コイルとしては，抵抗型 HTS 限流器用素子として適用実績がある Nexans（ドイツ）製の Bi2212/CuNi 複合導体<sup>[6,7]</sup>を用いた．その外観および断面構造を Fig.2.2 に示す．Bi2212（断面積： $2 \times 3\text{mm}^2$ ）は，Melt Cast Processed (MCP)法によって製作されたバルク導体（導体長：10.16m）である．Bi2212 バルク導体のクエンチ時におけるホットスポットの形成を回避するために，その外周に金属シャントとして CuNi（Cu:Ni=70:30，断面積： $2 \times 1.5\text{mm}^2$ ）を複合した．Bi2212/CuNi 複合バルク導体の初期形状はチューブ状であり，モノファイラコイル形状（ターン数：70，ピッチ：3mm）に切削加工することによって HTc-SFCLT の低圧側コイルを製作した．ターン間およびコイル表面には機械的強度と電気絶縁性能の向上のためにエポキシ樹脂（厚さ：1mm）を含浸するとともに，最内層の FRP 製シリンダによって低圧側コイル全体としての機械的補

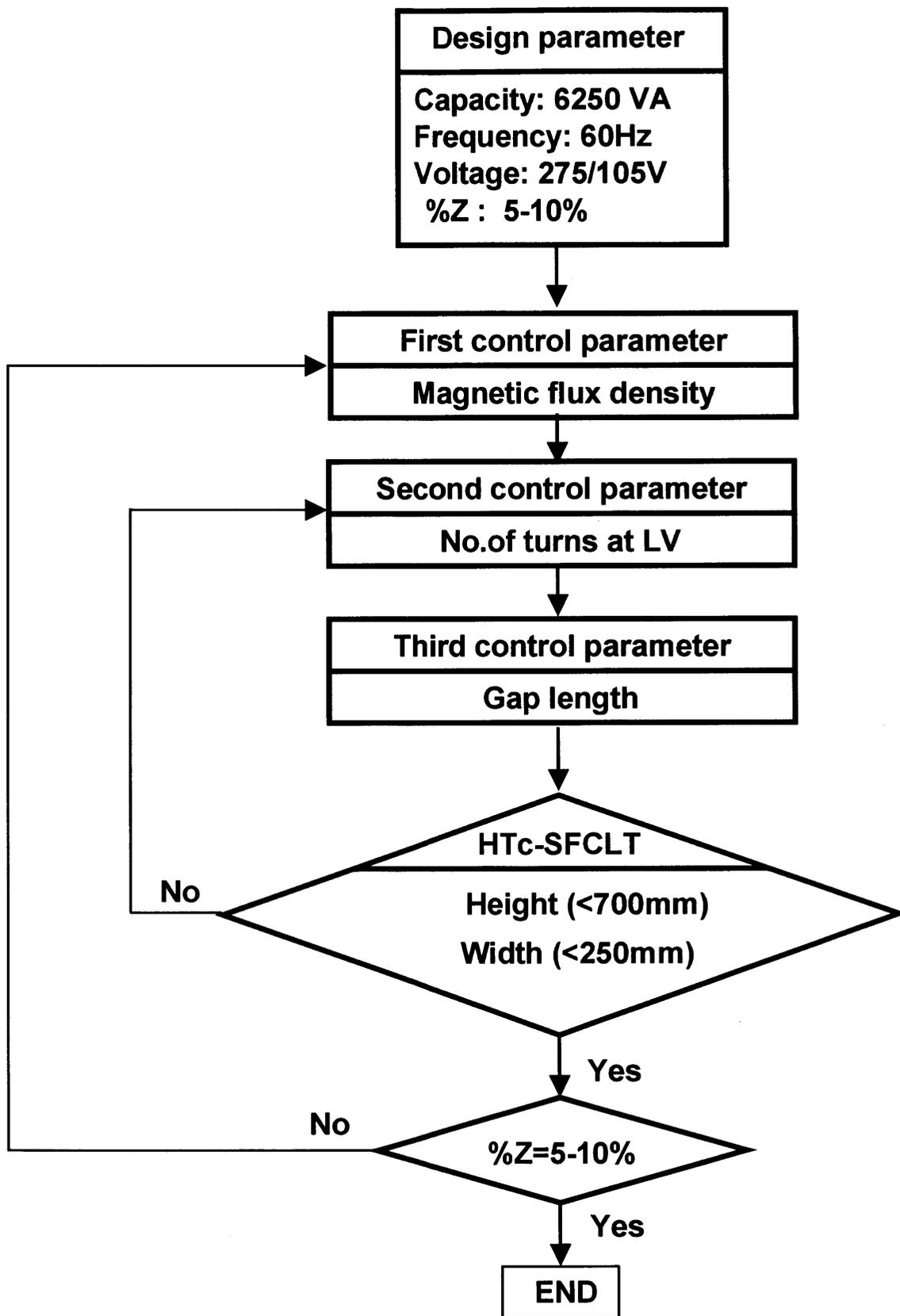
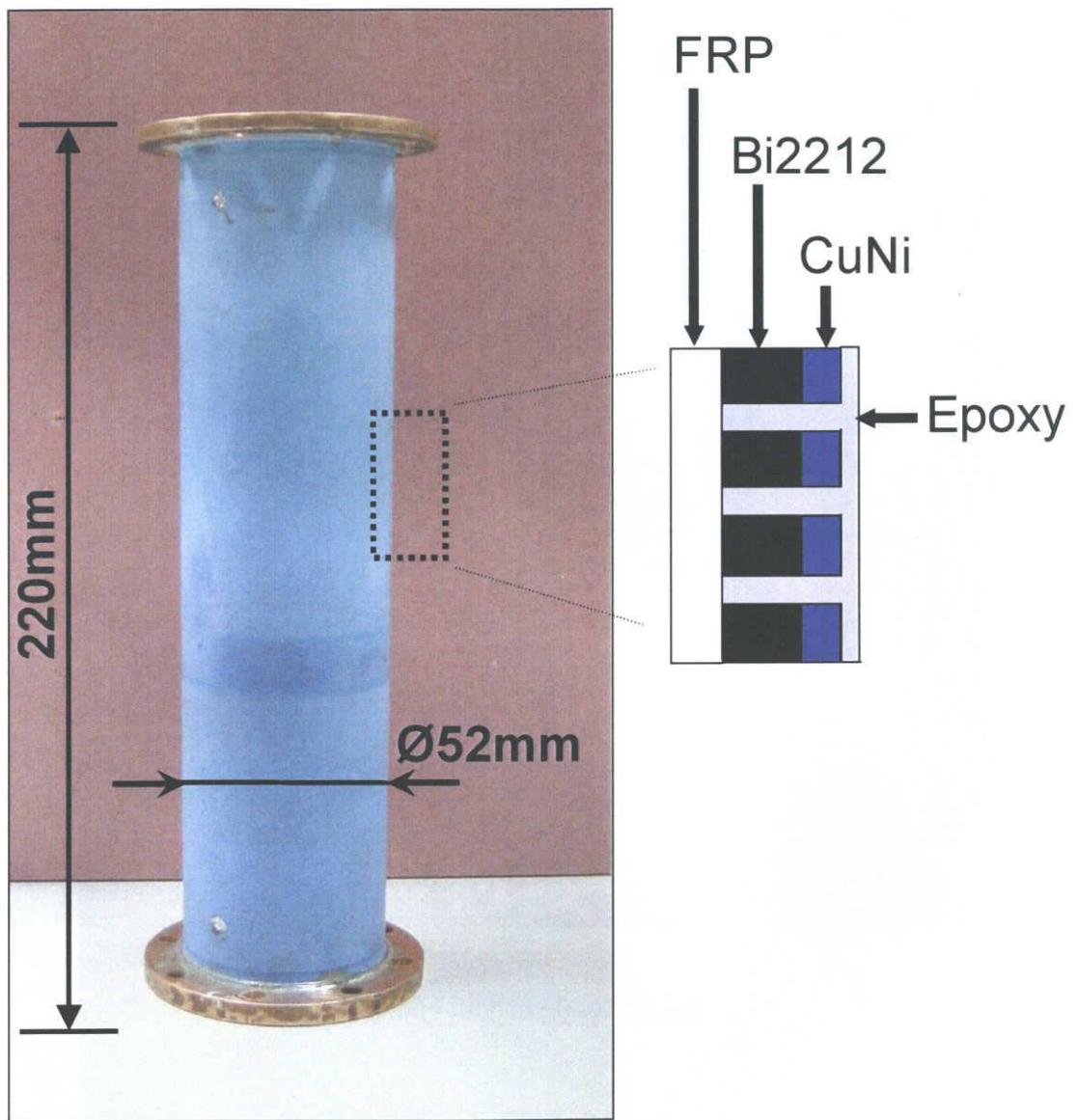


Fig.2.1 Flowchart of SFCLT design



(a) Outer view

Fig.2.2 Bi2212 bulk coil



(b) Bi2212 coil without epoxy impregnation

Fig.2.2 Bi2212 bulk coil

強を施した。MCP 法による Bi2212 バルクチューブの製作限界から Bi2212/CuNi 複合バルク導体の外径：52mm，長さ：220mm とし，両端に銅製フランジを取り付けたものを HTc-SFCLT の低圧側要素コイルとした。さらに，2 個の要素コイルを直列接続することにより，HTc-SFCLT の低圧側コイルとした。

なお，Bi2212/CuNi 複合バルク導体は，通電電流レベル，交流損失およびクエンチ時の導体内発生電界などの点において，超電導限流器用導体として適用可能な特性を有しており，バイファイラコイル形状に切削加工した抵抗型超電導限流器が 77K および 65K において優れた通電・限流特性を示すことが報告されている<sup>[6,7,8]</sup>。HTc-SFCLT は，上記のバイファイラコイル形状の限流器コイルをモノファイラコイル形状の変圧器コイルとして活用し，その断面構造・寸法を HTc-SFCLT 用に設計したものである。

### 2. 3. 2 鉄心

HTc-SFCLT の構造をモデル器として単純化するために，鉄心を高圧側・低圧側コイルとともに液体窒素に浸漬冷却するものとした。HTc-SFCLT の変圧器としての構造は内鉄形であり，鉄心の片脚に低圧側コイルと高圧側コイルを同心状に配置した。低圧側要素コイルの寸法制約の下で鉄心の占積率を向上するために，Table 2.2 および Fig.2.3 に示すような鉄心の仕様および寸法・断面形状とした（占積率：85.3%）。鉄心の材料はケイ素鋼である。また，定格電圧：159V/61V を発生するために，鉄心の最大磁束密度を 1.84T とし，低圧側要素コイルを 2 個直列接続してターン数を 140 とした。これにより，鉄心の脚幅：35mm および窓幅：45.1mm に対して窓高さ：499mm となり，縦長の C カット構造とした。

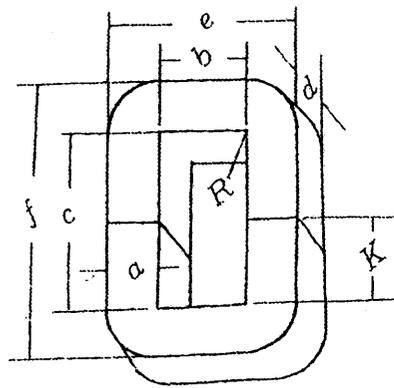
### 2. 3. 3 高温超電導限流変圧器の組み立て

HTc-SFCLT の組み立て工程を Fig.2.4(a)～(d)に示す。各図の説明は，以下の通りである。

(a) 左側：低圧側コイル（2.3.1 節の Bi2212/CuNi 要素コイルを 2 個直列接続）

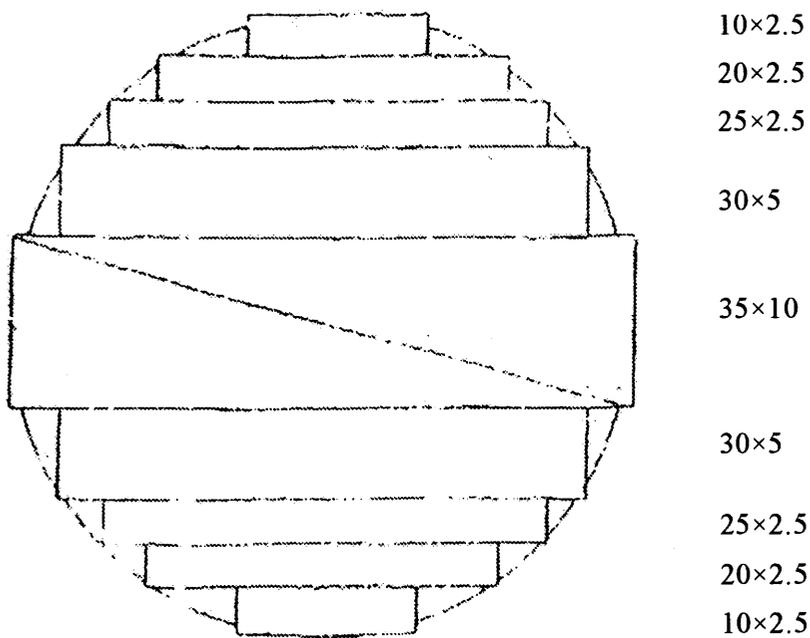
Table 2.2 Specifications of iron core

Effective cross sectional area	8.88 cm <sup>2</sup>
Average magnetic path length	119.29 cm
Frequency	50 Hz
Weight	8.1 kg



- a = 35 mm
- b = 45.1 mm
- c = 499 mm
- d = 35 mm
- e = 115.1 mm
- f = 569 mm
- inner R = 3 mm
- outer R = 39 mm

(a) Overview



(b) Cross section

Fig.2.3 Dimensions of iron core

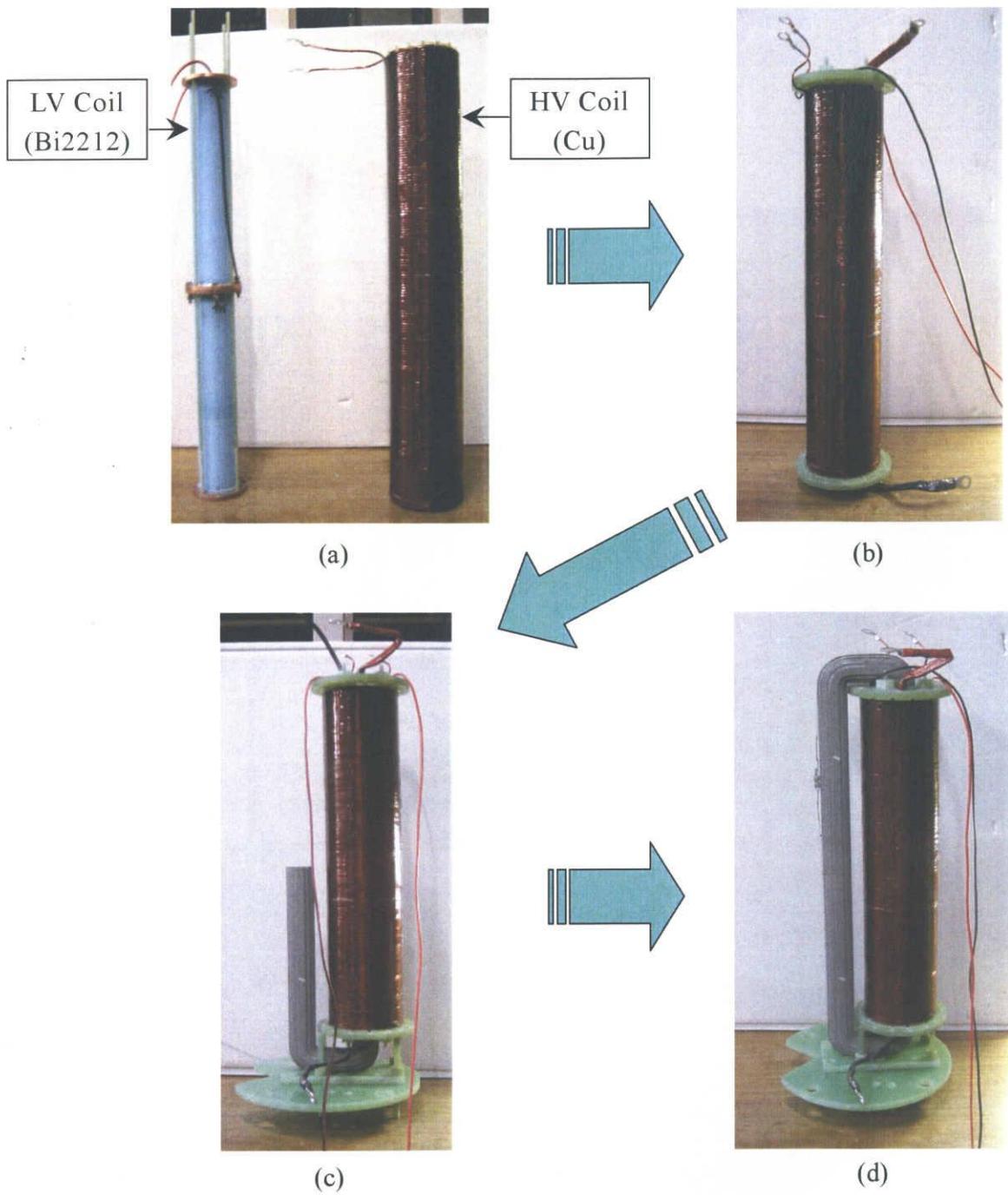


Fig.2.4 Assembly of HTc-SFCLT

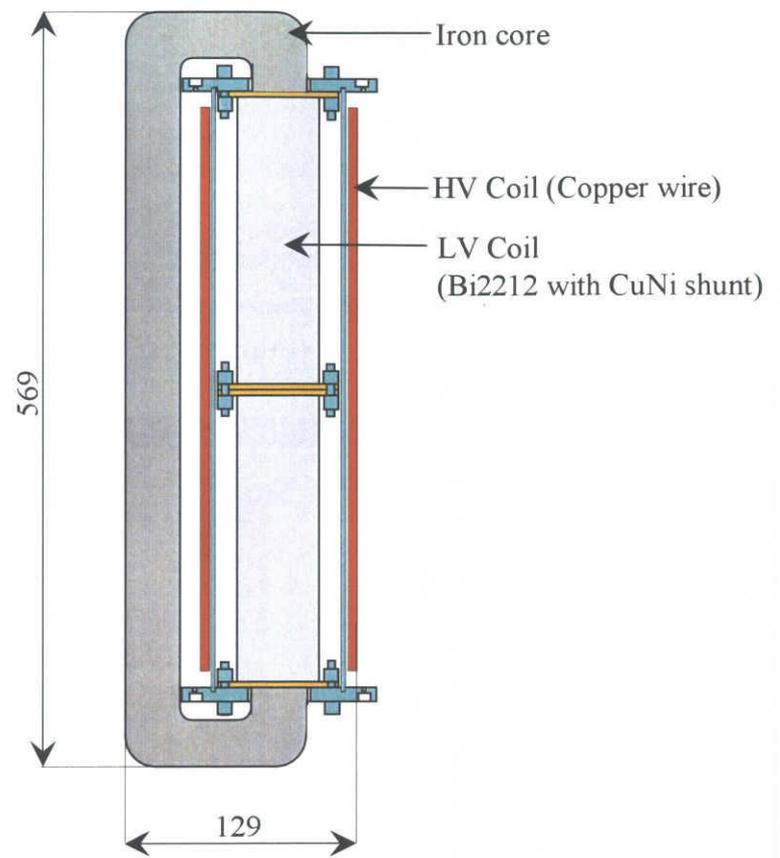


Fig.2.5 Construction of HTc-SFCLT

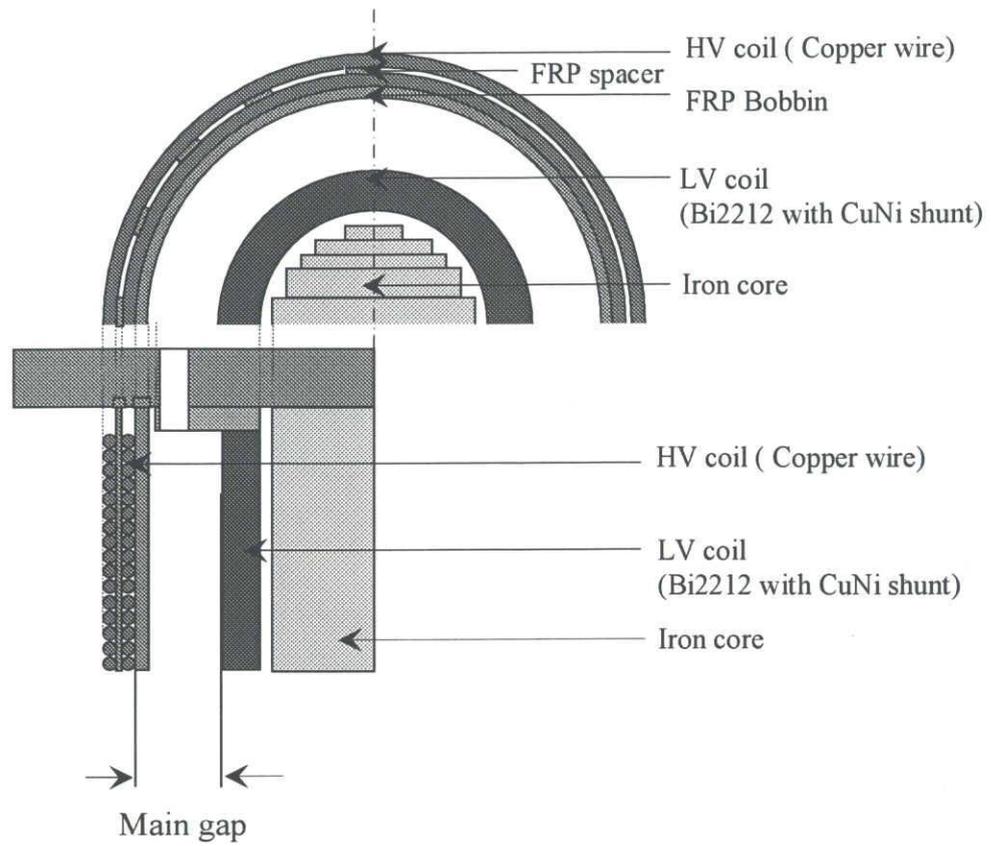


Fig.2.6 Construction of HV coil and LV coil

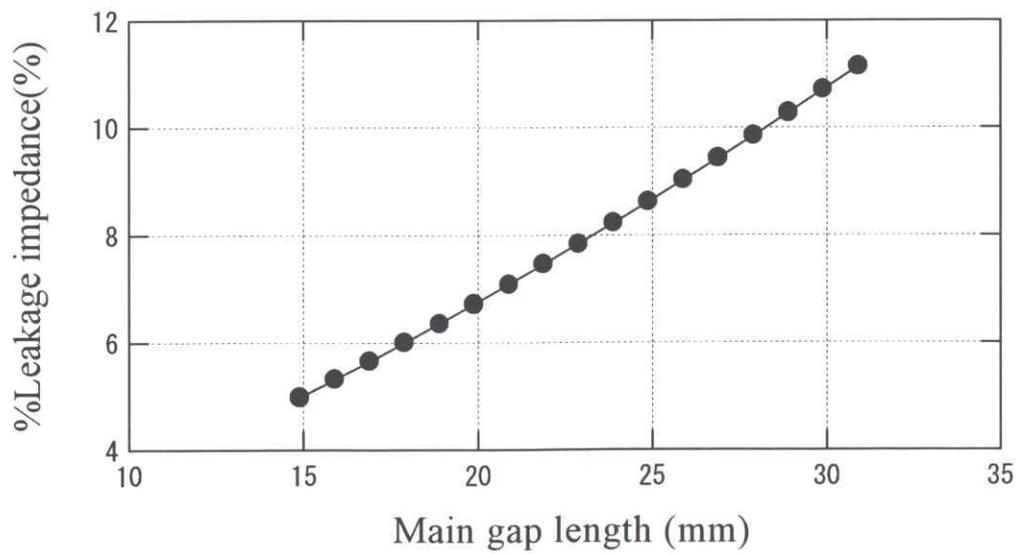


Fig.2.7 Leakage impedance as a function of main gap length

右側：高圧側コイル（銅，直径：2.3mm，ターン数：183／層×2層）

(b)高圧側コイルの内側に低圧側コイルを挿入

(c)高圧側／低圧側コイルを 2.3.2 節の C カット鉄心（下部）に挿入

(d)C カット鉄心（上部）を挿入

以上の工程を経て組み立てられた HTc-SFCLT の完成写真および断面構造を Fig.2.5 および Fig.2.6 に示す。

## 2. 3. 4 漏れインピーダンスおよび限流インピーダンス

(a)漏れインピーダンス

HTc-SFCLT の漏れインピーダンスは，高圧側コイルと低圧側コイルとのギャップ長（Fig.2.6 参照）によって調整することができる．漏れインピーダンスのギャップ長依存性（計算値）を Fig.2.7 に示す．同図およびクライオスタットの寸法制約より，本研究における HTc-SFCLT の漏れインピーダンスは 5～10%の範囲で可変である．Fig.2.5 の HTc-SFCLT においてはギャップ長：15mm であり，漏れインピーダンス：4.98%（設計値）である．

(b)限流インピーダンス

Table 2.1 に EMTP から得られた限流インピーダンス 125% ( $2.2\Omega$ ) に近い値の HTc-SFCLT の限流インピーダンスを求める．HTc-SFCLT の限流動作においては，Bi2212 の全長がクエンチするものと仮定した．Bi2212 および CuNi の断面積と 100K における抵抗率（Bi2212： $10^{-5}\Omega\text{m}$ ，CuNi： $3.7\times 10^{-7}\Omega\text{m}$ ）および要素コイルにおける Bi2212/CuNi 複合導体の有効長より，HTc-SFCLT の限流器としての限流インピーダンス  $R(\text{Bi2212/CuNi})$  は，以下のように計算される．

$$R(\text{Bi2212}) = 10^{-5} \times \frac{10.16}{2 \times 3 \times 10^{-6}} = 16.93 \Omega$$

$$R(\text{CuNi}) = 3.7 \times 10^{-7} \times \frac{11.15}{2 \times 1.5 \times 10^{-6}} = 1.38 \Omega$$

$$R(\text{Bi2212/CuNi}) = \frac{16.93 \times 1.38}{16.93 + 1.38} \times 2 = 2.56 \Omega \quad (\text{要素コイル2個直列接続時})$$

この値はベースインピーダンス (1.76 Ω) の 145%に相当し、Table2.1 の最適設計値 (125%) および LTc-SFCLT の実測値 (117~188%) と同程度であることから、十分な限流効果を期待することができる。

## 2. 4 まとめ

本章では、SFCLT 開発の PHASE-3 として、高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) を設計・製作した。HTc-SFCLT の設計・製作上の特徴は、以下の通りである。

- (1) 設計定格は、三相、6.25kVA、275V/105V であり、単相分として定格電圧：159V/61V の HTc-SFCLT を製作した。
- (2) 低圧側コイルは Bi2212 バルク導体、高圧側コイルは銅線というハイブリッド構成であり、鉄心とともに液体窒素に浸漬冷却する。
- (3) 変圧器としての漏れインピーダンスは、低圧側コイルと高圧側コイルとのギャップ長を調整することにより、5~10%の範囲で可変である。
- (4) 低圧側コイルの Bi2212 バルク導体には CuNi が複合されており、過電流通電によるクエンチ・限流動作時に Bi2212 バルク導体内のホットスポット形成を回避するとともに、十分な限流効果を期待することができる。
- (5) EMTP から得られた最適化の限流インピーダンス 125% (2.2Ω) をもとにして、HTc-SFCLT の限流インピーダンスを求めた。その結果、Bi2212 の全体がクエンチする際に限流インピーダンスは 145% (1.76 Ω) に相

当し、Table2.1 の最適設計値（125%）および LTc-SFCLT の実測値（117～188%）と同程度であることから、十分な限流効果を期待することができる。

## 【第2章の文献】

- [1] N.Hayakawa, et al: “Feasibility Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT)”, *Cryogenics*, Vol.40, pp.325-331 (2000)
- [2] N.Hayakawa, et al: “A System Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Function of Fault Current Suppression and System Stability Improvement”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.1936-1939 (2001)
- [3] 加川, 他: 「超電導限流変圧器の動作特性と電力システムへの導入効果」, *電気学会論文誌 B*, 121 巻 11 号, pp.1572-1578 (2001)
- [4] H.Kagawa, et al: “Experimental Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) for Fault Current Suppression and System Stability Improvement”, *Physica C*, Vol.372-376, Part III, pp.1706-1710 (2002)
- [5] H.Okubo et al: “Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Functions of Fault Current Suppression and System Stability Improvement”, *IEEE PES T&D*, Vol.1, pp.301-306 (2002)
- [6] M.Noé, et al: “Investigation of high-Tc bulk material for its use in resistive superconducting fault current limiters”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol.11, No.1, pp.1960-1963 (2001)
- [7] S.Elschner, et al: “Manufacturing and Testing of MCP 2212 bifilar Coils for a 10 MVA Fault Current Limiter”, *ASC2002*, 2LA03 (2002)
- [8] M.Noé, et al: “Testing bulk HTS modules for resistive superconducting fault current limiters”, *ASC2002*, 2LA02 (2002)

## 第3章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の基礎特性試験

### 3. 1 まえがき

第2章では、三相、6.25kVA、275V/105Vの高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) を設計し、その単相分を製作した。供試 HTc-SFCLT は、Bi2212/CuNi 複合導体からなる低圧側コイルと銅製の高圧側コイルとのハイブリッド構成であり、その機能は Bi2212/CuNi 複合導体の通電特性に依存する。したがって、供試 HTc-SFCLT の機能を検証するためには、Bi2212/CuNi 複合導体の基礎的な通電特性を把握することが必要不可欠である。

そこで、本章では、供試 HTc-SFCLT の基礎特性を実験的に検証する。まず、第2章で設計・製作した Bi2212/CuNi 複合導体コイルに直流電流を通電して、コイルの直流臨界電流を求める。次に、得られた直流臨界電流を基準に、HTc-SFCLT の限流特性を把握する上で必要な Bi2212/CuNi 複合導体コイルの交流通電特性試験を行い、過電流による発生抵抗を測定する。また、HTc-SFCLT の変圧器としての機能を検証するために、無負荷試験および短絡試験を行い、巻数比および漏れインピーダンスの値を設計値と比較・検証する。

### 3. 2 Bi2212/CuNi 複合導体の通電特性

#### 3. 2. 1 直流臨界電流

第2章で製作した Bi2212/CuNi 複合導体からなる2個の低圧側要素コイル (コイル A, コイル B) の直流臨界電流を Fig.3.1 に示す実験回路を用いて測定した。各コイルを液体窒素に浸漬し、直流電流源 (1000A, 5V) から電流上昇率: 20A/sec で通電し

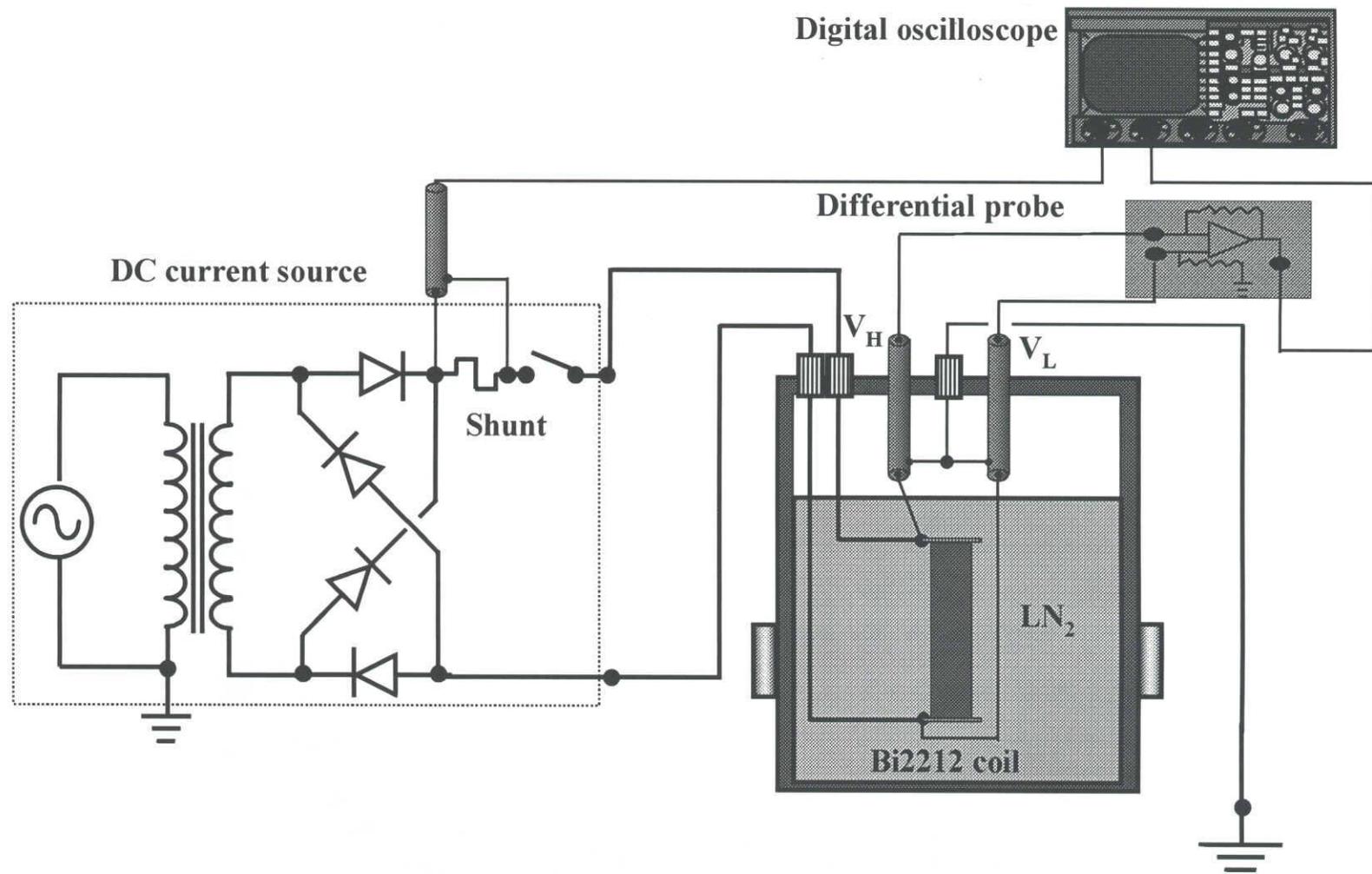


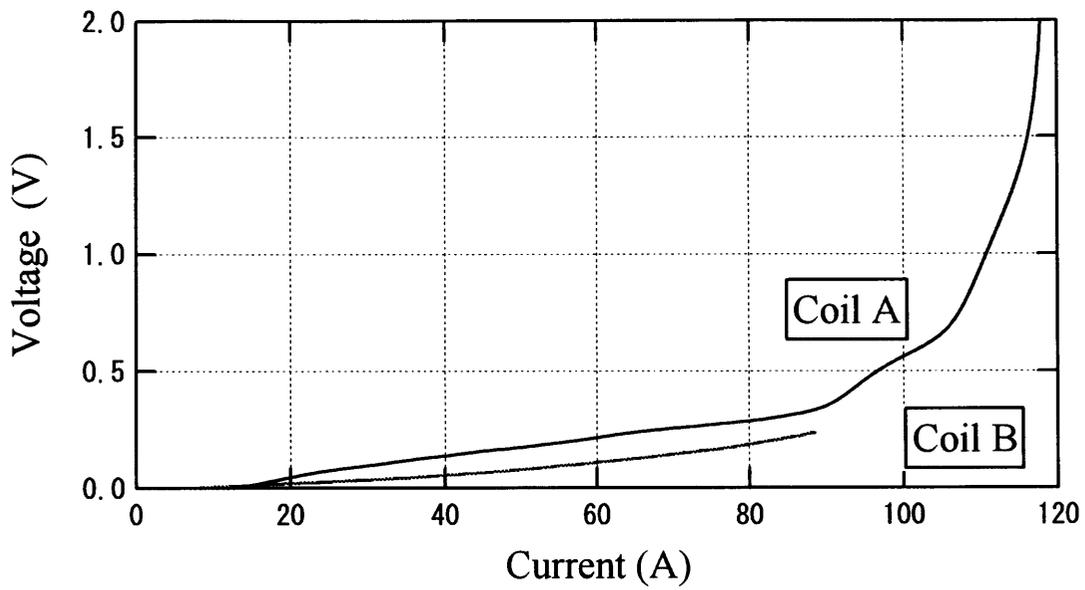
Fig.3.1 Experimental setup for DC test

た。通電電流をシャント抵抗 ( $1\text{m}\Omega$ ) によって測定した。さらに、各コイルの端子間電圧 (銅製フランジ間) を差動プローブによって測定し、通電電流とともにデジタルオシロスコープに記録した。コイル A およびコイル B における端子間電圧の通電電流依存性 (E-J 特性) を Fig.3.2 に示す。(a)図に示すように、各コイルの小電流領域においてカレントトランスファが見られた。これは、端子間電圧を銅製フランジ間で測定しているためであると考えられる。そこで、カレントトランスファ分を補正した E-J 特性を(b)図に示す。同図より、臨界電流を電界基準： $1\mu\text{V}/\text{cm}$  を考慮して、Bi2212 導体長は  $10.16\text{m}$  であるため、 $1.016\text{mV}$  の電圧が出る時の電流を臨界電流で定義した。このことより、両コイルの直流臨界電流はコイル A： $57\text{A}$ 、コイル B： $63\text{A}$  であることがわかる。

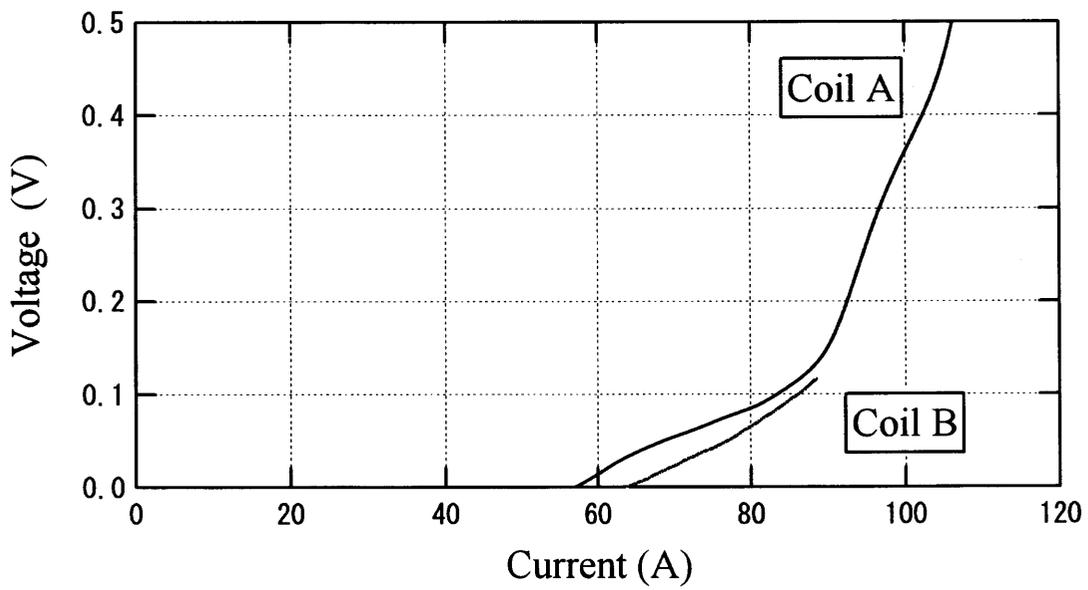
### 3. 2. 2 交流通電特性

前項の直流臨界電流を測定した後、電源回路を変更して交流通電特性を測定した。交流通電特性の測定回路を Fig.3.3 に示す。2 組の変圧器 ( $200/400\text{V}$ ,  $3810/210\text{V}$ ) とサイリスタスイッチを組み合わせ、各コイルに周波数： $60\text{Hz}$  の交流大電流を 1~5 サイクル通電した。通電電流をクランプ型 CT によって測定し、端子間電圧とともにデジタルオシロスコープに記録した。

コイル A の 1 サイクル通電時における通電電流・端子電圧波形を Fig.3.4 に示す。(a) 図は通電電流波高値  $I=150\text{A}_{\text{peak}}$  (直流臨界電流の 2.6 倍) の結果であり、電流・電圧波形ともに正弦波であり、かつ電流波形が電圧波形よりも位相が  $90^\circ$  遅れていることを確認することができる。一方、(b)図は  $I=420\text{A}_{\text{peak}}$  (直流臨界電流の 7.4 倍) の結果であり、電流・電圧波形ともに歪んでおり、かつ両者がほぼ同相である。以上の結果より、 $I=420\text{A}_{\text{peak}}$  では、供試コイルに抵抗成分が発生していることがわかる。また、 $I=150\text{A}_{\text{peak}}$  では直流臨界電流を超えているものの、電流・電圧波形を変歪させる程の抵抗成分は発生していないとすることができる。このような交流通電特性は、Fig.3.5(a)



(a) With current transfer



(b) Without current transfer

Fig.3.2 E-J characteristics of Bi2212 coil A and B

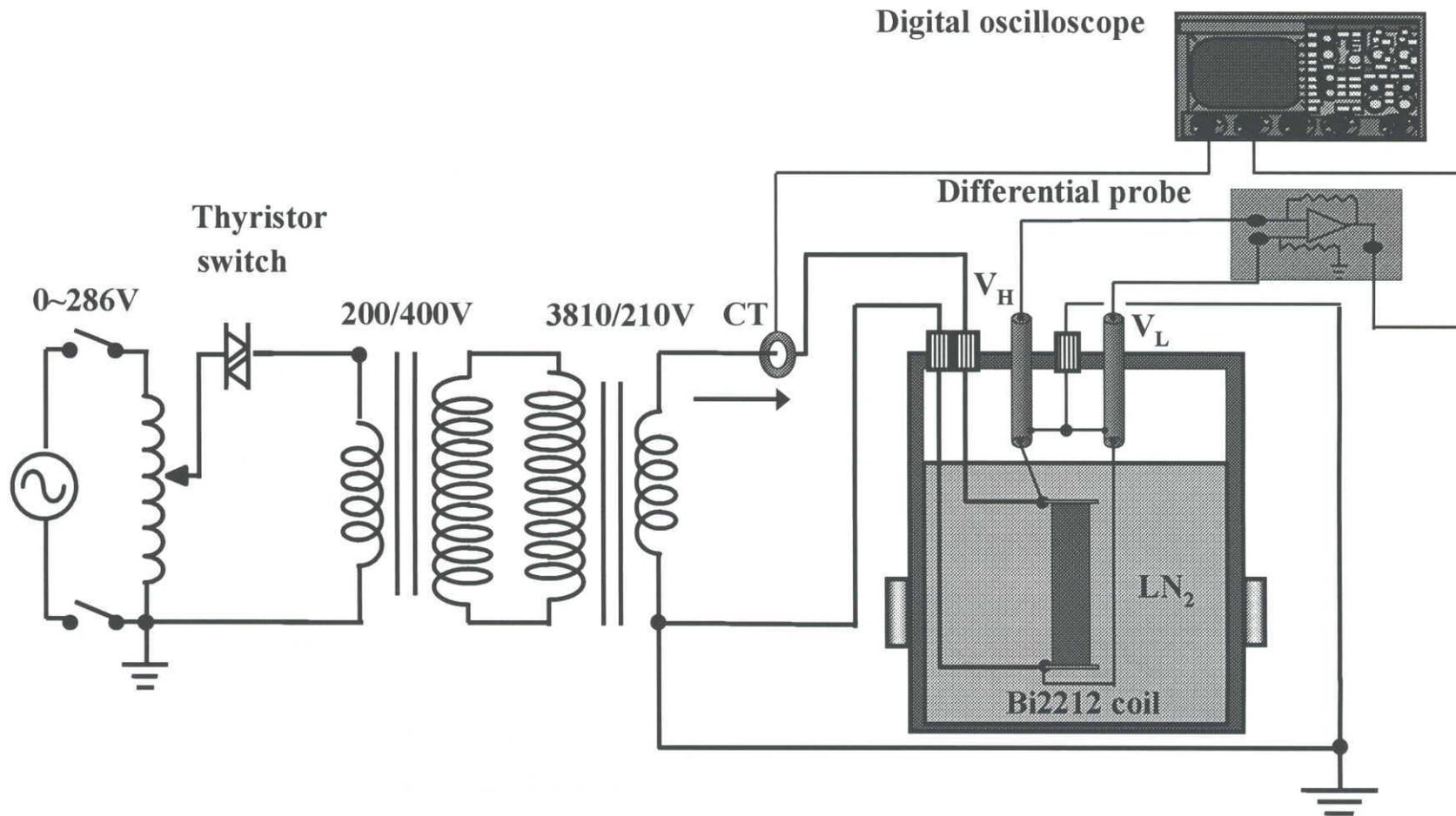
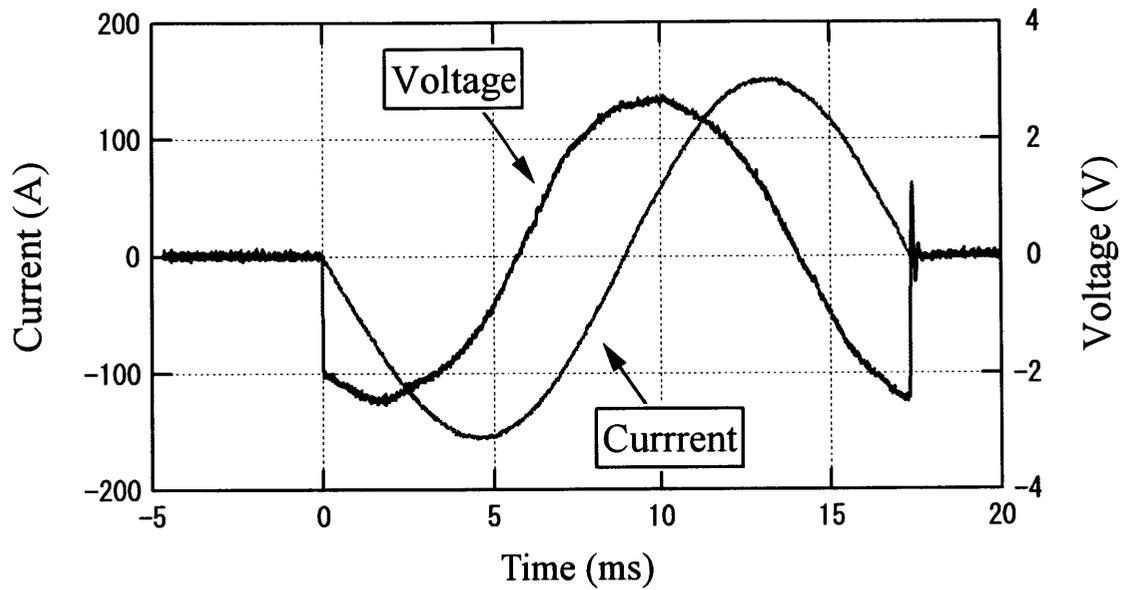
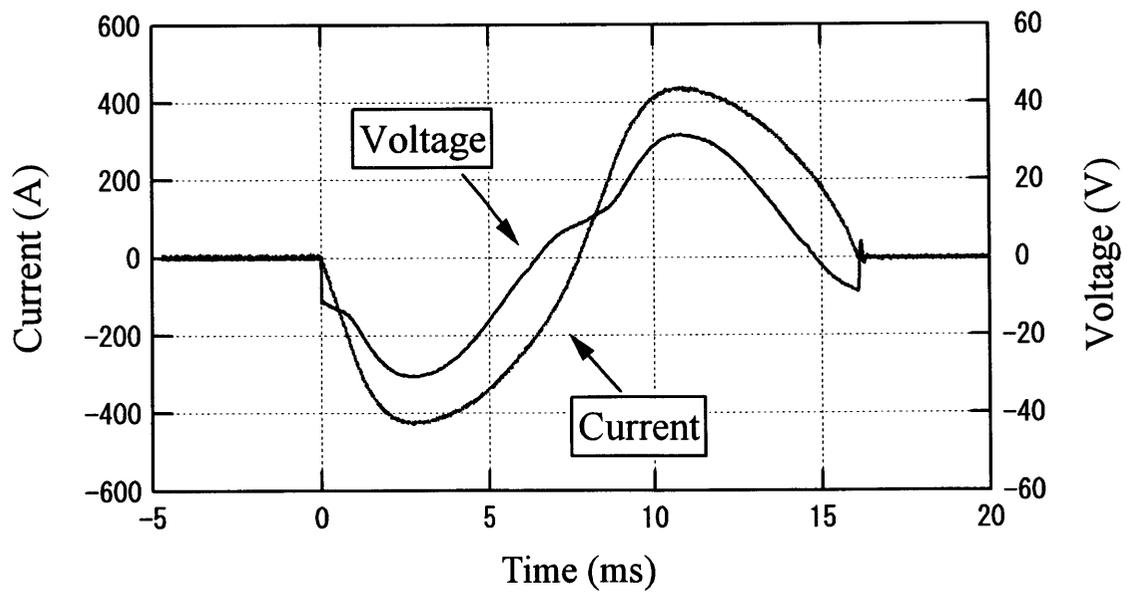


Fig.3.3 Experimental setup for AC test

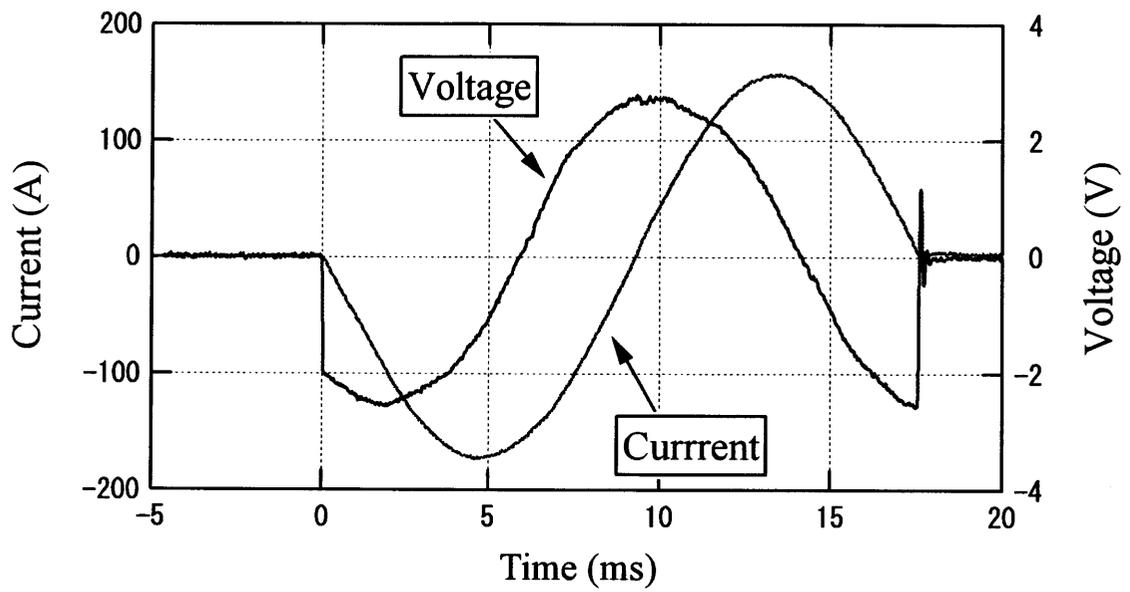


(a)  $I = 150 A_{\text{peak}}$

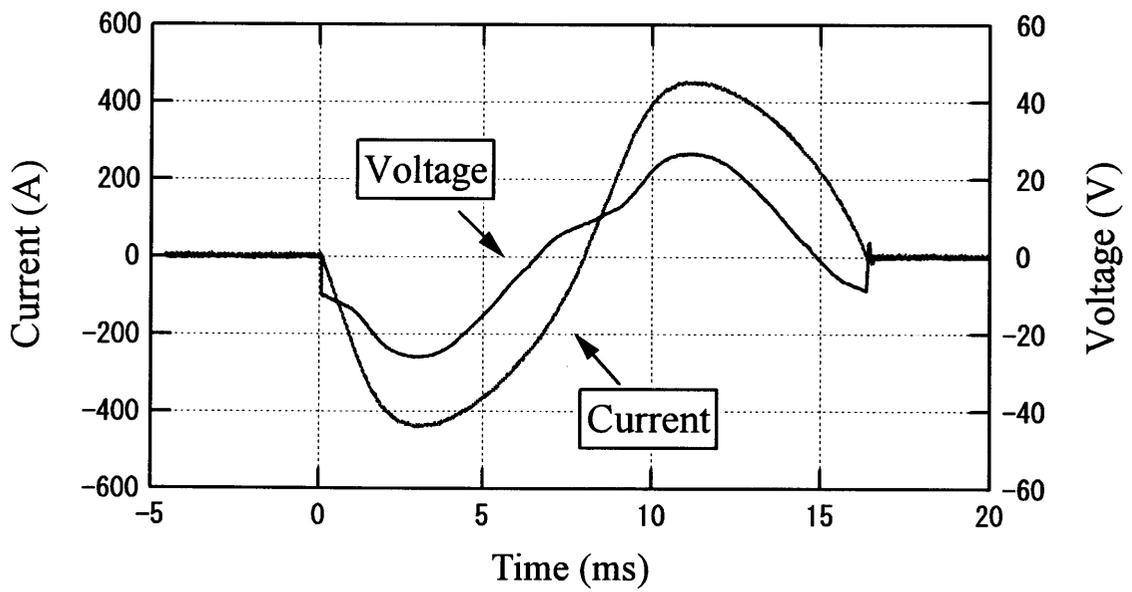


(b)  $I = 420 A_{\text{peak}}$

Fig.3.4 Waveforms of current and voltage of coil A



(a)  $I = 150 A_{\text{peak}}$



(b)  $I = 430 A_{\text{peak}}$

Fig.3.5 Waveforms of current and voltage of coil B

および(b)に示すコイル B の実験結果についても同様である。

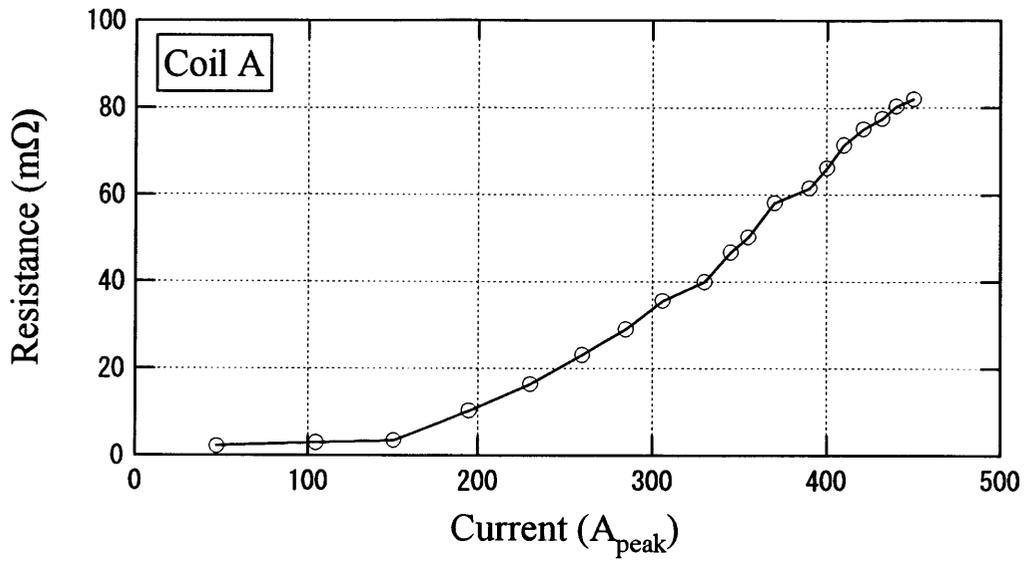
Fig.3.4 および Fig.3.5 の電流・電圧波形より、各コイルの発生抵抗を求めることができる。すなわち、 $v = Ri + L \frac{di}{dt}$  の関係より、電流波形のピーク値 ( $\frac{di}{dt} = 0$ ) における電流および電圧の瞬時値の比が抵抗値となる。このようにして求められたコイル A およびコイル B における発生抵抗の通電電流波高値依存性を Fig.3.6(a)および(b)に示す。同図は、通電電流波高値を直流臨界電流の約 8 倍 (コイル A :  $450A_{peak}$ , コイル B :  $500A_{peak}$ ) まで 1 サイクル通電した場合の実験結果である。また、5 サイクル通電時における発生抵抗の時間変化を Fig.3.7 に、さらにその通電電流依存性を Fig.3.8 に示す。各図より、発生抵抗は通電電流波高値および通電期間とともに上昇することがわかる。しかし、 $I = 450A_{peak}$  を 5 サイクル通電した場合における両コイルの合成抵抗は  $260m\Omega$  であり、HTc-SFCLT として期待された限流インピーダンス ( $2.43\Omega$ ) の 11% に過ぎないことがわかる。今後、通電電流波高値をさらに上昇させた場合の発生抵抗を取得することが必要であると考えられる。

### 3. 3 無負荷試験および短絡試験

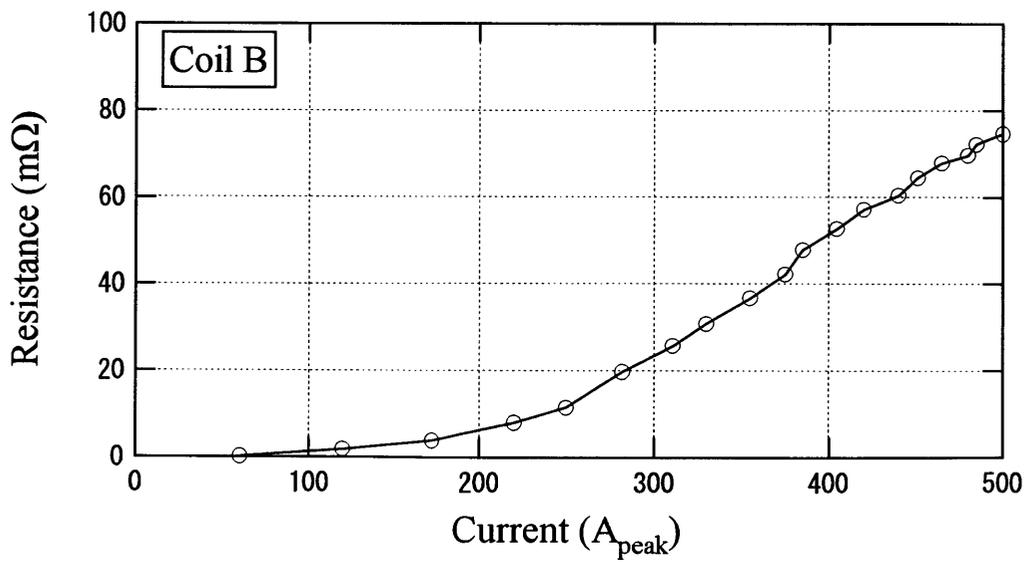
Fig.2.5 の HTc-SFCLT を組み立てて液体窒素に浸漬し、変圧器としての機能を検証するため、無負荷試験および短絡試験を行った。

#### 3. 3. 1 無負荷試験

HTc-SFCLT の無負荷試験の実験回路を Fig.3.9 に示す。同図において、HTc-SFCLT の高圧側を開放し、低圧側から励磁した。高圧側コイルの端子電圧  $V_{HV}$  を定格電圧 ( $159V$ ) の 0~100% の範囲で変化させ、低圧側コイルの端子電圧  $V_{LV}$  および励磁電流  $I_{LV}$  とともにデジタルオシロスコープに記録した。

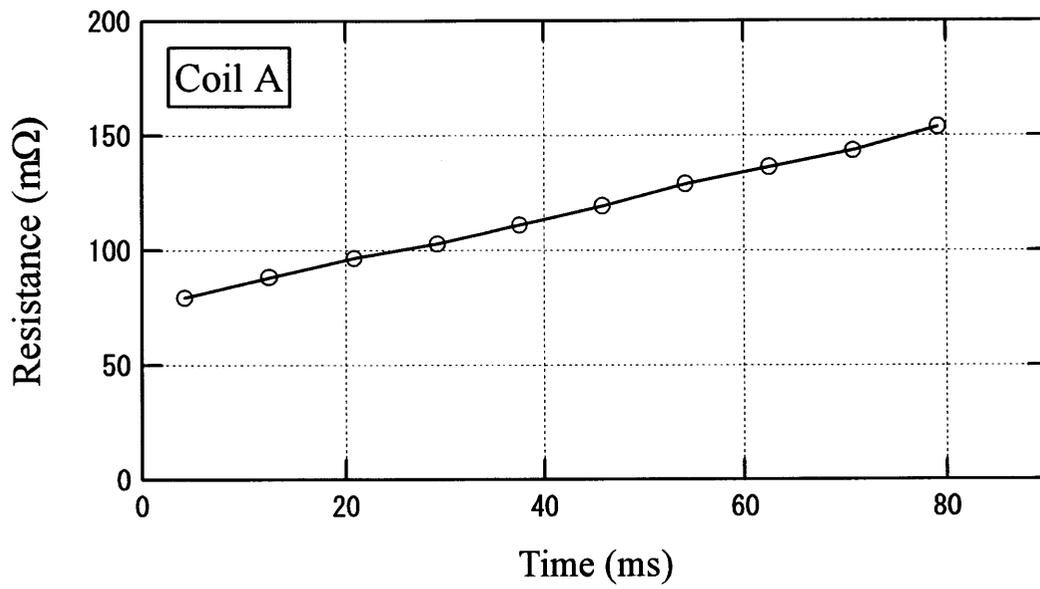


(a) Coil A

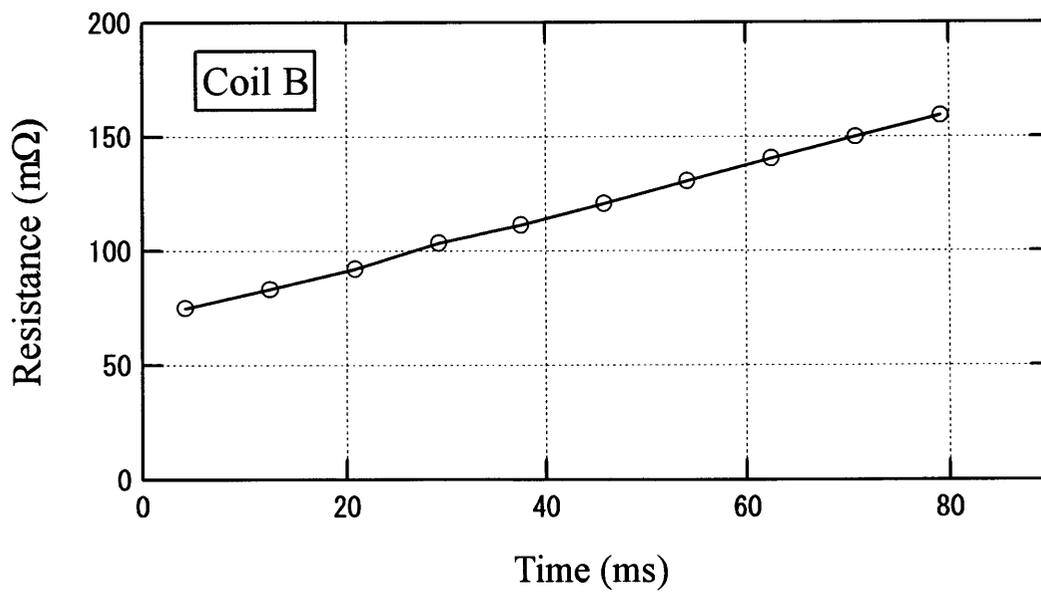


(b) Coil B

Fig.3.6 Resistance of coil A and B as a function of peak current  $I_{peak}$

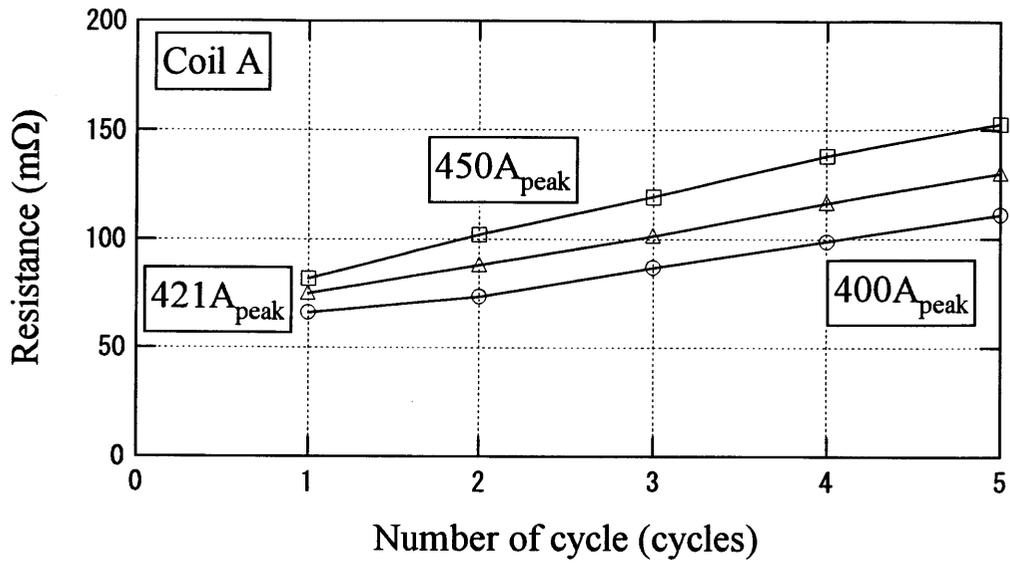


(a) Coil A ( $I_{\text{peak}} = 450 \text{ A}$ )

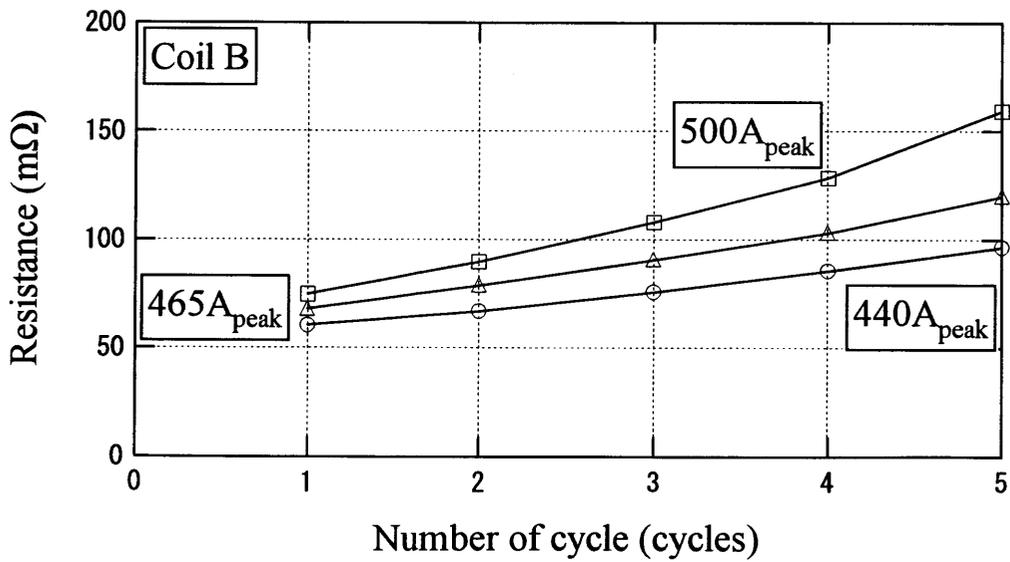


(b) Coil B ( $I_{\text{peak}} = 500 \text{ A}$ )

Fig.3.7 Resistance of coil A and B as a function of time



(a) Coil A



(b) Coil B

Fig.3.8 Resistance of coil A and B as a function of number of cycle

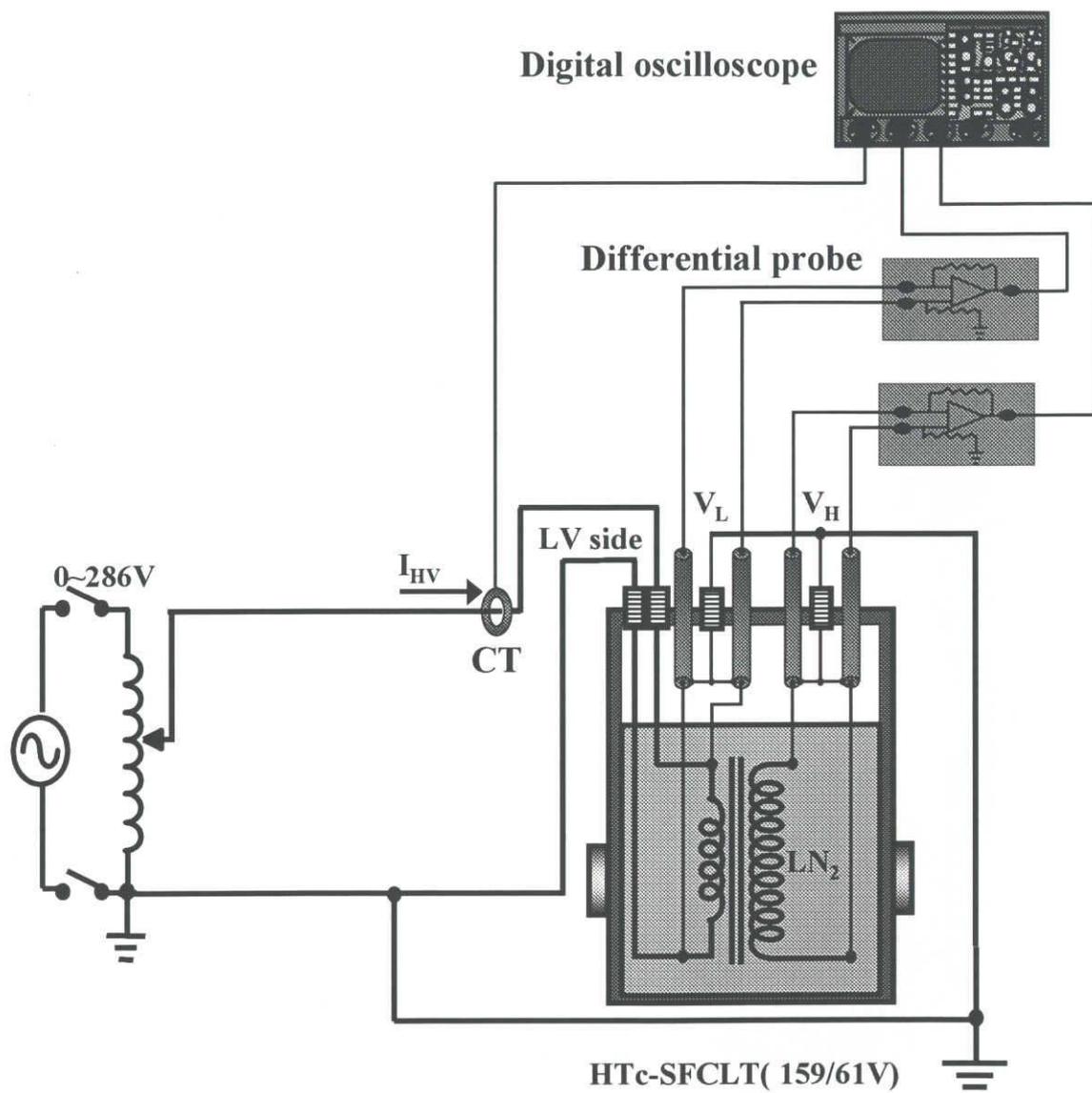
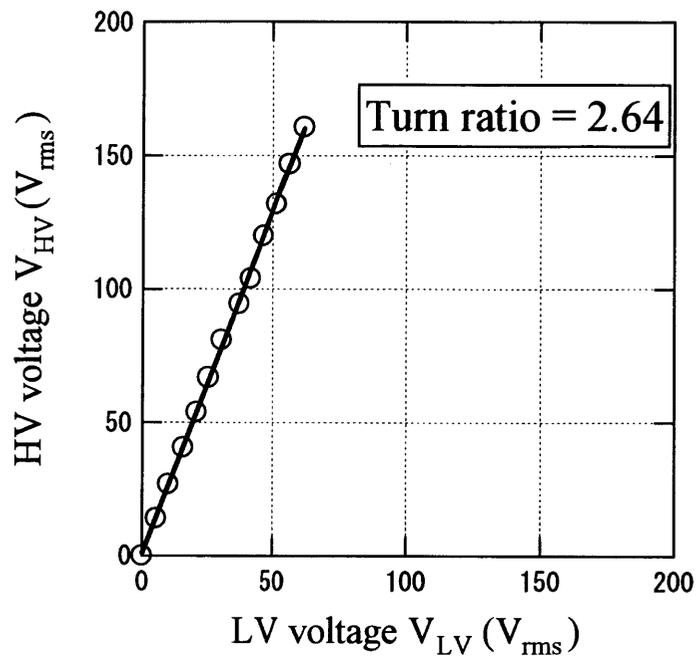
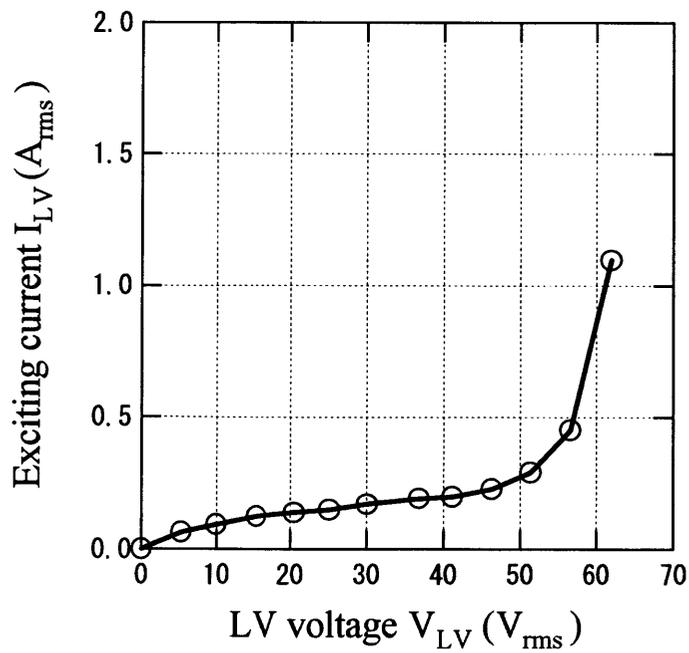


Fig.3.9 Experimental setup for no load test

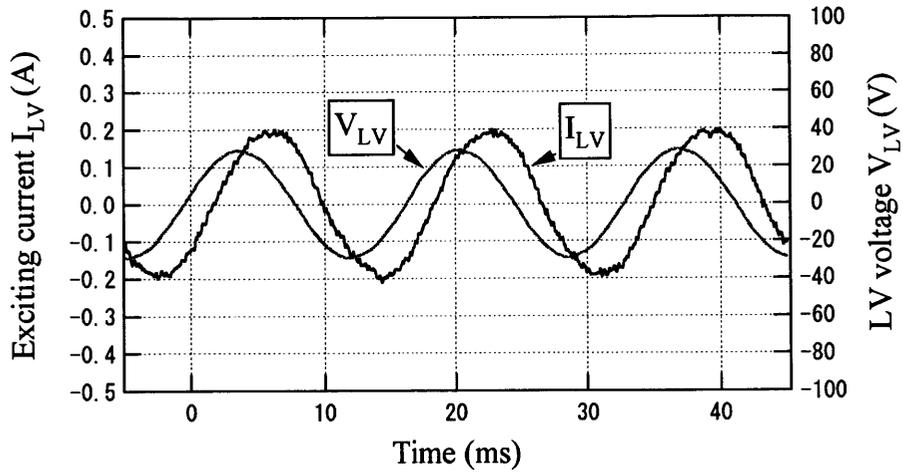


(a) Relation between high-voltage voltage  $V_{HV}$  and low-voltage voltage  $V_{LV}$

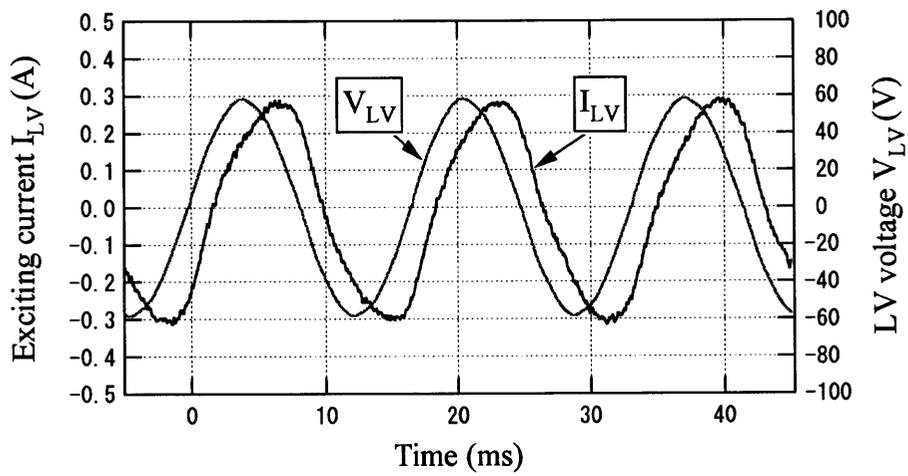


(b) Exciting current  $I_{LV}$  as a function of low-voltage  $V_{LV}$

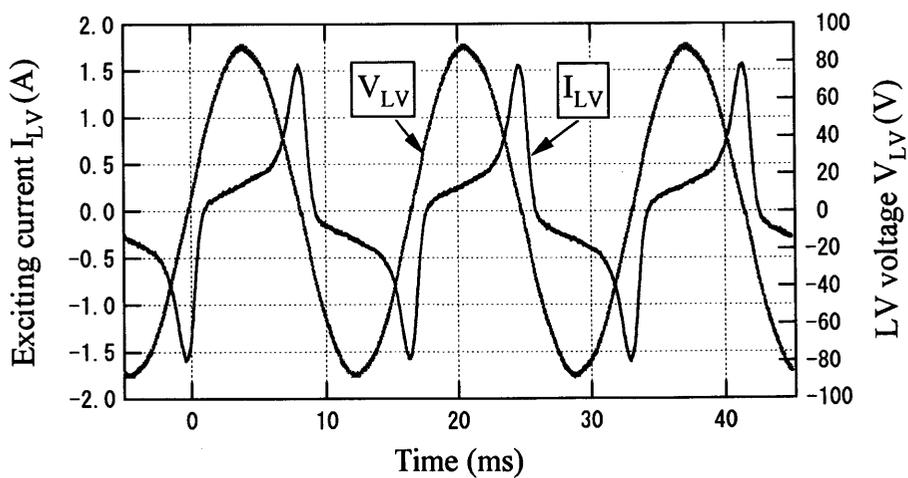
Fig.3.10 Experimental result of no load test



(a) LV voltage  $V_{LV} = 20 V_{rms}$



(b) LV voltage  $V_{LV} = 41 V_{rms}$



(c) LV voltage  $V_{LV} = 61 V_{rms}$

Fig.3.11 Waveforms of exciting current  $I_{LV}$  and LV voltage  $V_{LV}$  at no load test

$V_{HV}$ と $V_{LV}$ との関係を Fig.3.10(a)に、 $I_{LV}$ と $V_{LV}$ との関係を Fig.3.10(b)に示す。(a)図より、 $V_{HV}$ と $V_{LV}$ とは比例関係にあり、近似直線の傾きから HTc-SFCLT の巻数比=2.64 が得られた。この値は、設計値の 2.61 とほぼ等しいとすることができる。さらに、(b) 図より、 $V_{LV}=50V_{rms}$  付近から  $I_{LV}$  が上昇しており、鉄心が飽和し始めていることがわかる。また、Fig.3.11 に(a) $V_{LV}=20V_{rms}$  (定格電圧の 33%)、(b) $V_{LV}=41V_{rms}$  (同 67%) および(c) $V_{LV}=61V_{rms}$  (同 100%) について、 $I_{LV}$  および  $V_{LV}$  の波形を示す。各図より、印加電圧の上昇とともに鉄心の飽和に起因して  $I_{LV}$  の波形が歪み、定格電圧においては典型的な励磁電流波形の変歪が見られていることがわかる。

### 3. 3. 2 短絡試験

HTc-SFCLT の短絡試験の実験回路を Fig.3.12 に示す。同図において、HTc-SFCLT の低圧側を短絡し、高圧側から電圧を印加した。低圧側コイルの通電電流  $I_{LV}$  がコイル A の直流臨界電流 (57A) の 0~500%となるように高圧側コイルの通電電流  $I_{HV}$  を制御し、高圧側コイルの端子電圧  $V_{HV}$  とともにデジタルオシロスコープに記録した。なお、サイリスタスイッチにより、通電期間は 5 サイクルとした。

$I_{HV}=40A_{rms}$  通電時における  $I_{HV}$  および  $V_{HV}$  の波形を Fig.3.13(a)に示す。同図より、電流波形が電圧波形よりも位相が  $90^\circ$  遅れていることを確認することができる。また、 $V_{HV}$  の  $I_{HV}$  依存性を Fig.3.13(b)に示す。同図において、 $V_{HV}$  と  $I_{HV}$  とは  $I_{HV}<70A_{rms}$  において比例関係にあり、近似直線の傾きから HTc-SFCLT の漏れインピーダンス=5.36%が得られた。この値は、設計値の 4.98%とほぼ等しいとすることができる。

以上の無負荷試験および短絡試験の結果より、巻数比および漏れインピーダンスの観点から、HTc-SFCLT の変圧器としての機能を検証することができた。なお、Fig.3.13(b)における  $I_{HV}>70A_{rms}$  の大電流領域では、 $V_{HV}$  が  $I_{HV}$  から逸脱し始めていることがわかる。 $I_{HV}=70A_{rms}$  は  $I_{LV}=258A_{peak}$  (直流臨界電流の 4.1~4.5 倍) に相当して

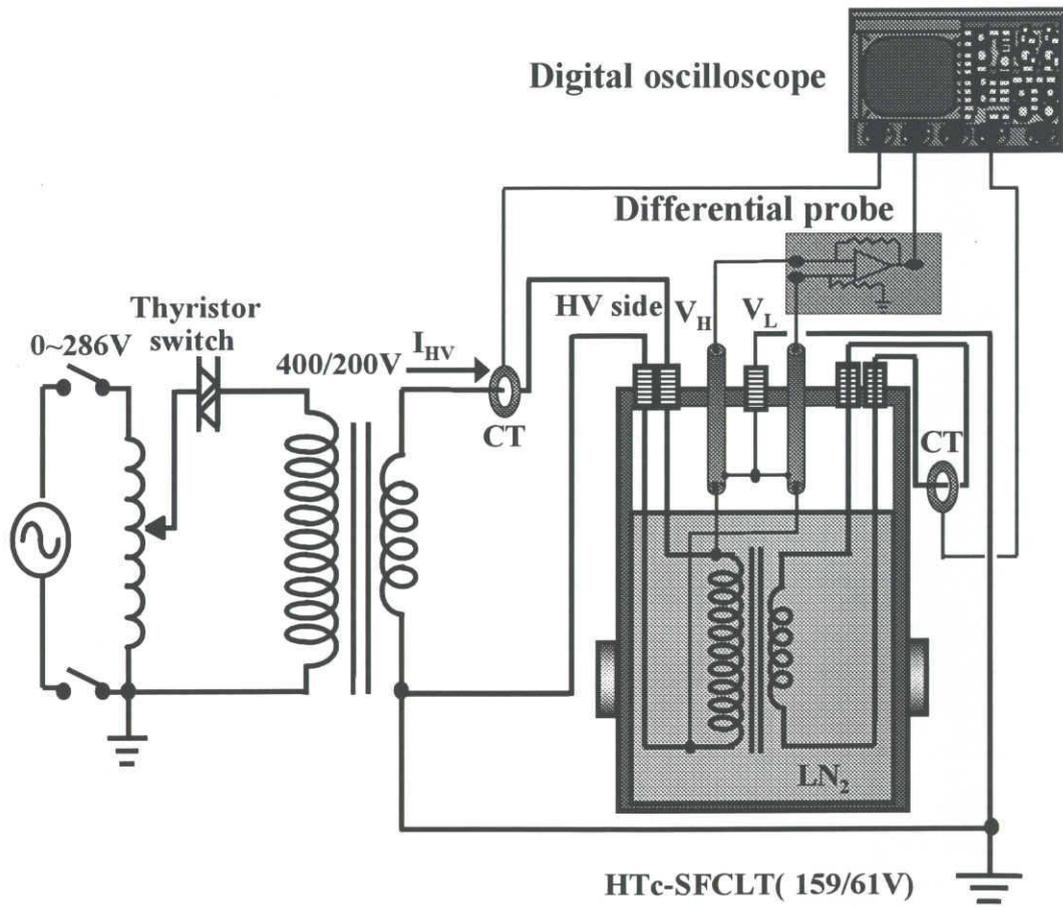
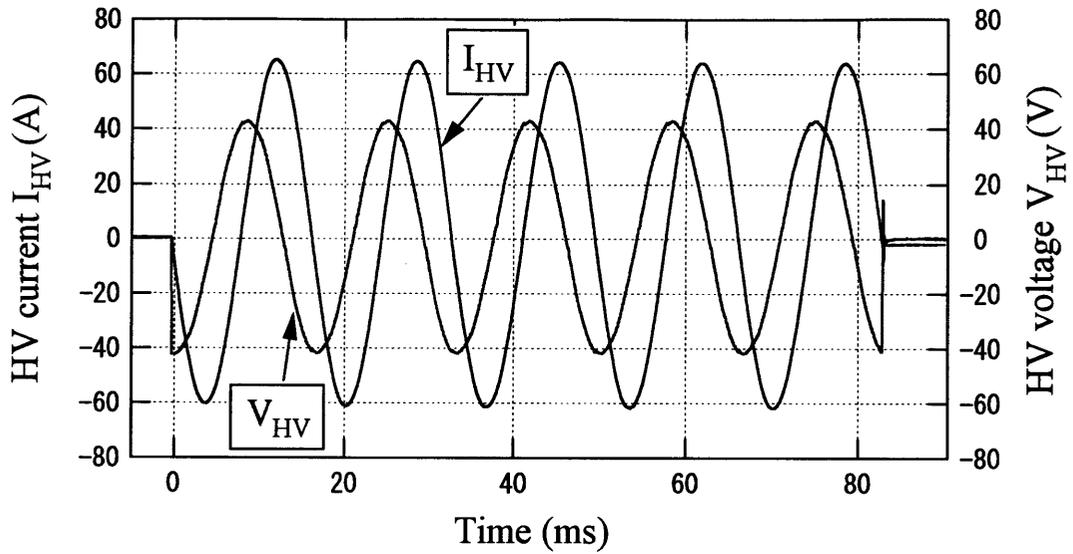
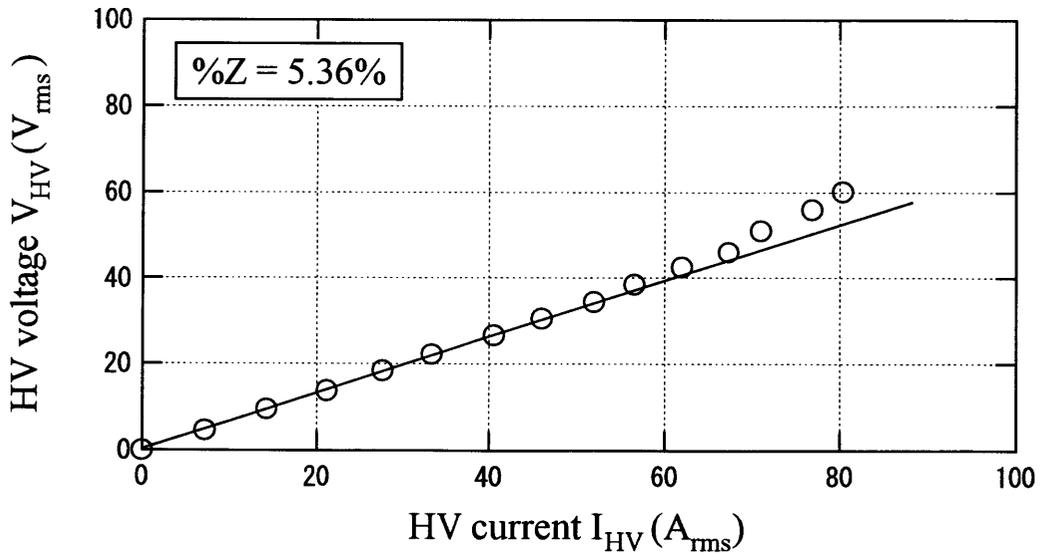


Fig.3.12 Experimental setup for short circuit test



(a) Waveforms of HV current  $I_{HV}$  and HV voltage  $V_{HV}$  ( $I_{HV} = 41 A_{rms}$ )



(b) Relation between HV voltage  $V_{HV}$  and HV current  $I_{HV}$

Fig.3.13 Experimental result of short circuit test

おり、Fig.3.6において各コイルの発生抵抗が上昇し始める電流領域に対応する。すなわち、HTc-SFCLTの限流器としての機能の一部も見られており、より大電流領域において十分な限流効果を期待することができる。この点については、次章で検証する。

### 3. 4 まとめ

本章では、高温超電導限流変圧器（HTc-SFCLT）の実現可能性を実験的に検証するために、第2章で設計・製作したBi2212/CuNi複合導体からなる2個の低圧側要素コイル（コイルA、コイルB）およびHTc-SFCLTの基礎特性試験を行った。その結果、以下の成果および知見が得られた。

- (1) 低圧側要素コイルの直流臨界電流（電界基準： $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ）として、コイルA：57A、コイルB：63Aが得られた。
- (2) 低圧側要素コイルに交流電流を通電し、通電電流波高値および通電期間の上昇によって抵抗が発生・増大することを明らかにした。また、直流臨界電流の約8倍までの交流電流波高値に対して、抵抗発生特性を取得した。
- (3) HTc-SFCLTの無負荷試験の結果、巻数比として設計値2.61にほぼ等しい2.64が得られた。さらに、定格電圧印加時において、鉄心の飽和に起因する典型的な励磁電流の変歪を確認した。
- (4) HTc-SFCLTの短絡試験の結果、漏れインピーダンスとして設計値4.98%にほぼ等しい5.36%が得られた。また、 $I_{\text{HV}} > 70\text{A}_{\text{rms}}$  ( $I_{\text{LV}} = 258\text{A}_{\text{peak}}$ ：直流臨界電流の4.1~4.5倍)の大電流領域において、低圧側コイルに発生抵抗の上昇が見られた。

以上の実験結果より、HTc-SFCLTの超電導変圧器としての基礎的な機能を検証することができた。

## 第4章 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の限流動作・ 超電導復帰特性試験

### 4. 1 まえがき

第3章では、単相、2.08kVA、159V/61Vの高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) を製作し、供試 HTc-SFCLT の機能を検証するため、Bi2212/CuNi 複合導体の基礎的な通電特性および HTc-SFCLT の変圧器としての基礎的な無負荷・短絡試験を行った。その結果、巻数比 2.64 および漏れインピーダンス 5.36%が得られ、設計値と比較して妥当であることを確認できた。また、 $I_{LV}=258A_{peak}$  の大電流領域において、低圧側コイルに発生抵抗の上昇が見られた。

本章では、供試 HTc-SFCLT の限流器特性について実験的検証を行う。HTc-SFCLT の限流器としての機能を検証するために、臨界電流以上の過電流を通電して、限流動作特性を取得する。その結果に基づいて、過電流通電時におけるインピーダンス・発生抵抗を取得し、限流動作特性について検討する。また、HTc-SFCLT の限流器における超電導復帰特性試験を行い、HTc-SFCLT の熱的特性、すなわち、限流動作中の注入パワー・蓄積熱エネルギーを計算する。さらに、超電導復帰特性を論じるため、蓄積熱エネルギーを Bi2212/CuNi 複合導体の温度上昇へ換算して、検討を行う。

### 4. 2 HTc-SFCLT の限流動作特性試験

HTc-SFCLT を大気圧液体窒素中に浸漬し、限流動作特性試験を行った。限流試験では、Fig.4.1 に示す大電流通電回路を用いた。低圧側コイルを短絡した短絡試験回路に



において、60Hzの交流大電流を5サイクル通電した。その際、高圧側コイルの端子電圧  $V_{HV}$  および通電電流  $I_{HV}$ 、低圧側コイルの通電電流  $I_{LV}$  を測定し、デジタルオシロスコープに記録した。

$I_{HV}$  と  $I_{LV}$  との関係を図4.2に示す。同図より、 $I_{HV}$  と  $I_{LV}$  とは比例関係にあり、近似直線の傾きから HTc-SFCLT の巻数比=2.64 が得られた。この値は、無負荷試験から得られた値 2.64 と同じ値であり、HTc-SFCLT の巻数比を再度確認することができる。また、低電流領域における  $V_{HV}$  と  $I_{HV}$  との関係を Fig.4.3 に示す。同図において、 $V_{HV}$  と  $I_{HV}$  とは  $I_{HV} < 80\text{Arms}$  において比例関係にあり、近似直線の傾きから HTc-SFCLT の漏れインピーダンス=5.36% が得られた。この値は、短絡試験から得られた値 5.36% と同じ値であり、HTc-SFCLT の漏れインピーダンスを再現している。

Fig.4.4 および Fig.4.5 に HTc-SFCLT の 5 サイクル通電時における高圧側コイルの端子電圧  $V_{HV}$ ・通電電流  $I_{HV}$  および低圧側コイルの通電電流  $I_{LV}$ ・固有短絡電流  $I_{PRO}$  の各波形をそれぞれ示す。Fig.4.4(a)は  $I_{PRO}=107A_{peak}$ 、 $I_{LV}=107A_{peak}$  (直流臨界電流の 1.9 倍) の結果であり、高圧側コイルの電流波形が電圧波形よりも位相が  $90^\circ$  遅れていることがわかる。すなわち、低圧側コイルには抵抗成分が発生していないことを意味する。これにより、Fig.4.4(b)に示すように、 $I_{LV}$  が  $I_{PRO}$  とほぼ一致した。一方、Fig.4.5(a)は  $I_{PRO}=800A_{peak}$ 、 $I_{LV}=444A_{peak}$  (直流臨界電流の 7.8 倍) の結果であり、高圧側コイルの端子電圧と通電電流との位相差が第 1 半波において  $23.9^\circ$ 、第 10 半波において  $4.7^\circ$  と小さくなっていることがわかる。これは、低圧側コイルに抵抗成分が発生したことを意味している。さらに、低圧側コイルの短絡電流波形を図4.5(b)に示す。同図より、短絡電流波高値は第 1 半波において  $444A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 55%)、5 サイクル後において  $300A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 37%) にまで限流されていることがわかる。

種々の  $I_{PRO}$  に対する短絡試験結果より、HTc-SFCLT の超電導変圧器としてのインピーダンスを図4.6に示す。同図において、 $I_{LV} < 280A_{peak}$  におけるインピーダンスは 5.36% で一定であり、超電導状態における漏れインピーダンスに相当する。一方、

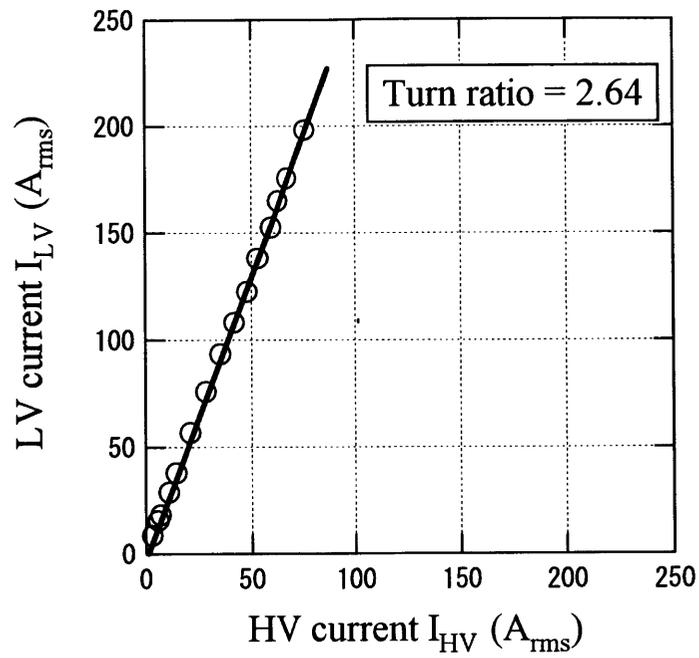


Fig.4.2 Relation between  $I_{LV}$  and  $I_{HV}$  from current limiting experiment.

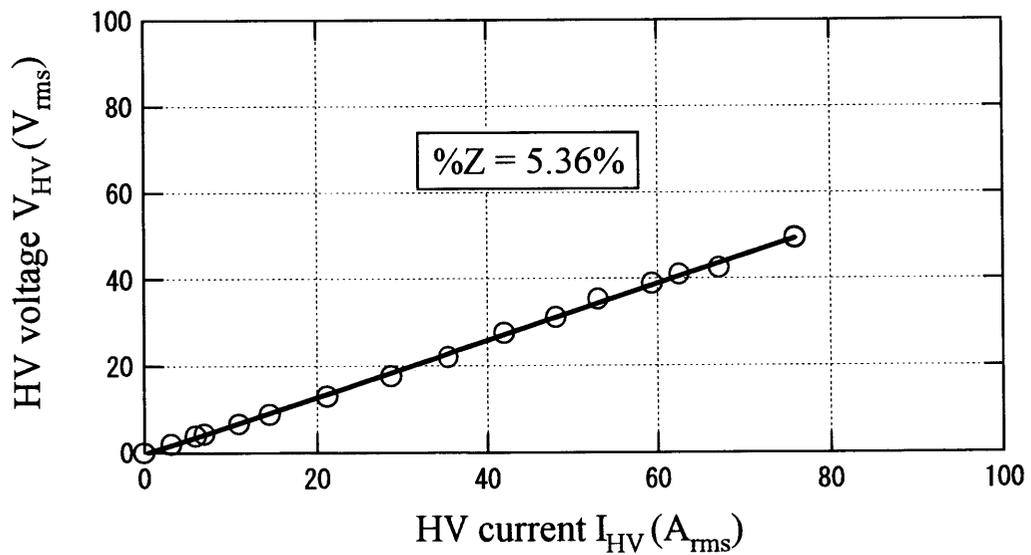
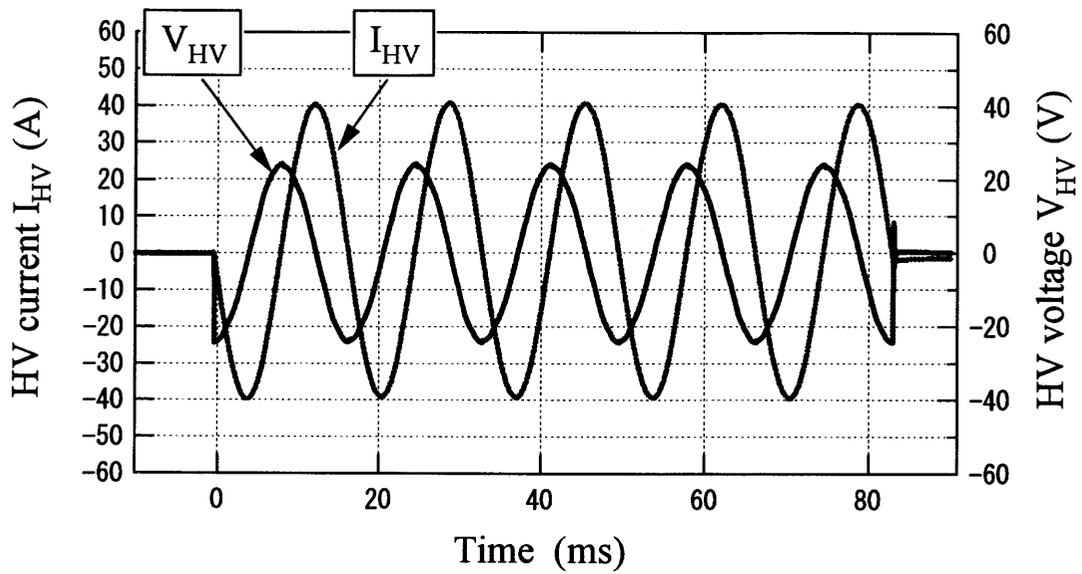
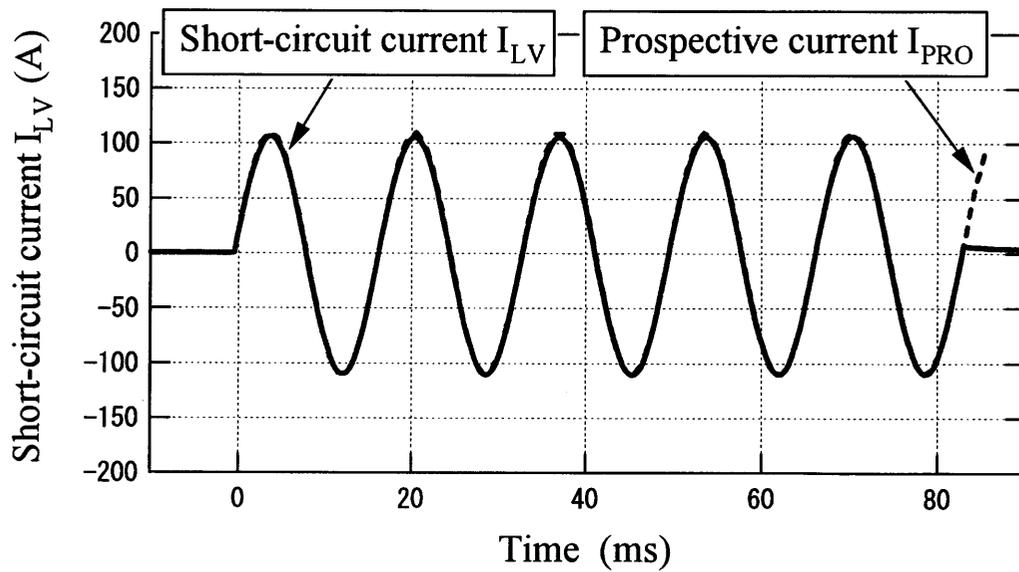


Fig.4.3 Relation between  $V_{HV}$  and  $I_{HV}$  from current limiting experiment.

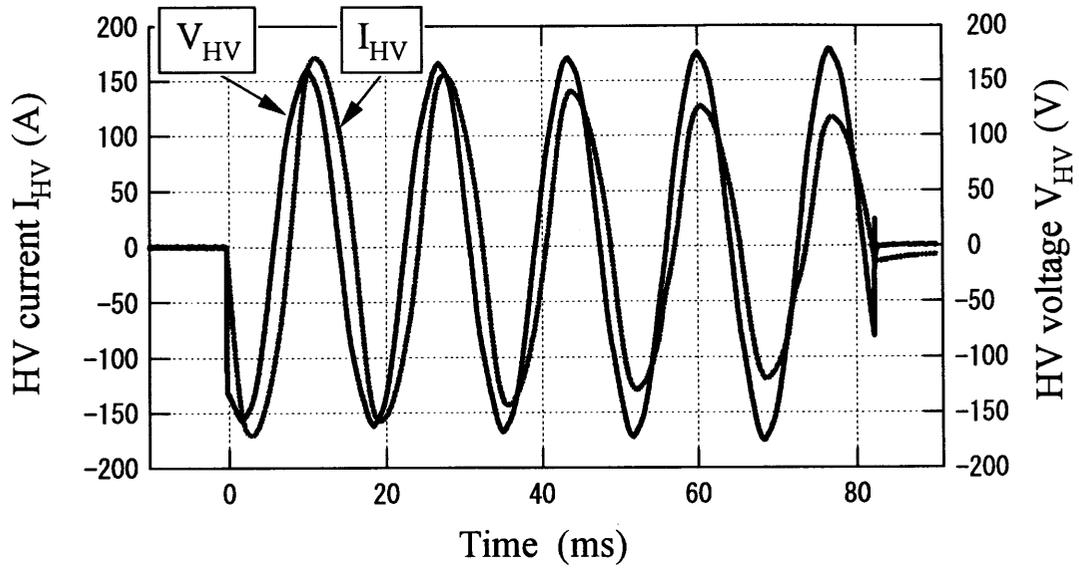


(a) Relation between  $V_{HV}$  and  $I_{HV}$  from current limiting experiment

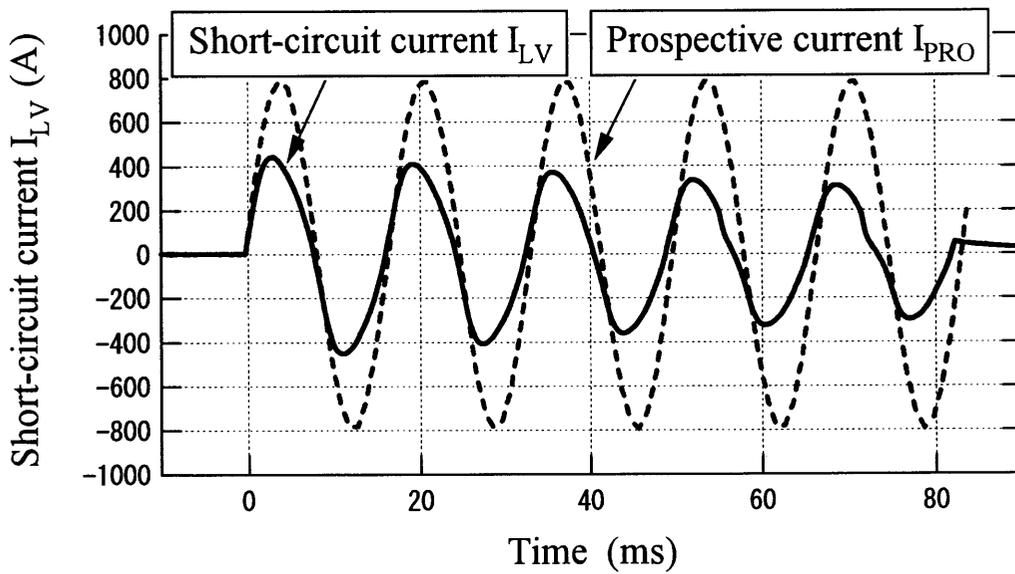


(b) Waveforms of short-circuit current and prospective current

Fig.4.4 Experimental result of current limiting test ( $I_{LV} = 107A_{peak}$ ).



(a) Relation between  $V_{HV}$  and  $I_{HV}$  from current limiting experiment.



(b) Waveforms of short-circuit current and prospective current.

Fig.4.5 Experimental result of current limiting test ( $I_{LV} = 444A_{peak}$ ).

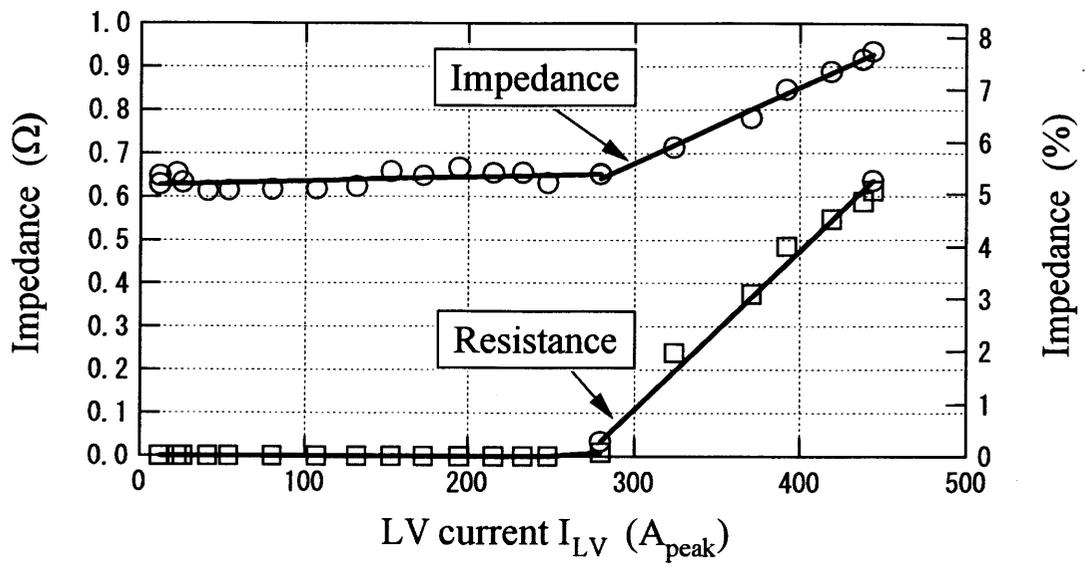


Fig.4.6 Impedance and resistance in current limiting test.

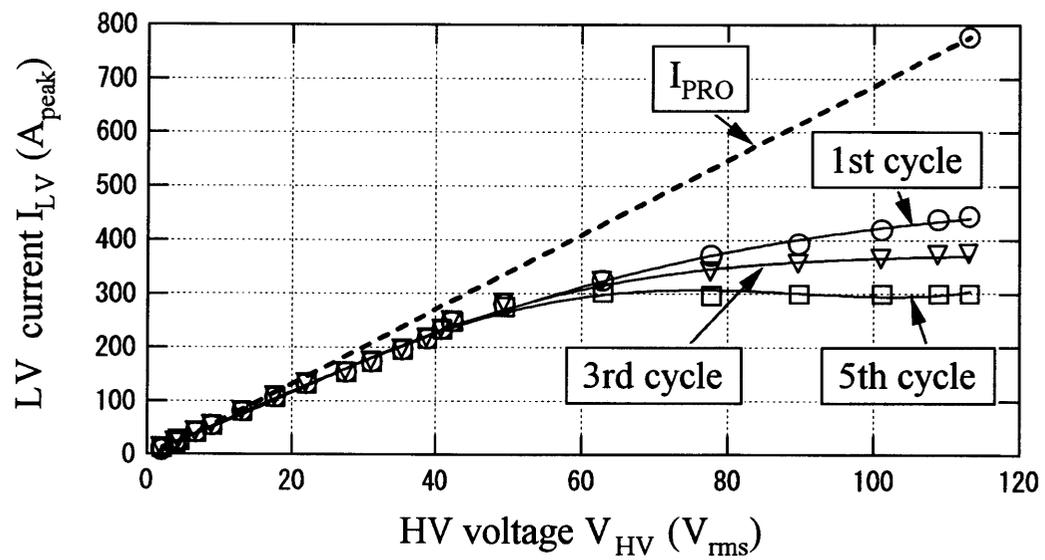


Fig.4.7  $I_{LV} - V_{HV}$  characteristics in current limiting test.

電流が増加すると抵抗成分が発生し、 $I_{LV} > 280 A_{peak}$  においては発生抵抗の影響が大きくなるため、見かけのインピーダンスが上昇していることがわかる。すなわち、大電流領域において HTc-SFCLT の超電導限流器としての機能を確認することができる。

HTc-SFCLT の限流動作を  $I_{LV}-V_{HV}$  特性として Fig.4.7 に示す。また、 $I_{LV}/I_{PRO}$  の  $I_{PRO}$  特性を Fig.4.8 に示す。両図より、HTc-SFCLT の限流動作は  $I_{PRO} > 120 A_{peak}$  (直流臨界電流  $I_c$  の約 2 倍) において見られ、 $I_{PRO} > 300 A_{peak}$  (直流臨界電流  $I_c$  の約 5 倍) において顕著となることがわかる。後者の大電流領域において、第 1 半波における  $I_{LV}$  は  $V_{HV}$  とともに上昇するが、5 サイクル後においては  $I_{PRO}$  に依存せず、 $I_{LV} \approx 300 A_{peak}$  で一定となった。これは、HTc-SFCLT の限流抵抗が時間とともに増大していることを意味する。

以上の結果より、HTc-SFCLT の超電導限流器としての限流動作を検証することができた。

#### 4. 3 HTc-SFCLT の超電導復帰特性試験

Fig.4.9 に HTc-SFCLT の超電導復帰試験回路を示す。同図において、HTc-SFCLT の低圧側に負荷抵抗とサイリスタスイッチを並列接続し、高圧側から励磁した。サイリスタスイッチを開いた状態で HTc-SFCLT の高圧側電圧  $V_{HV}$  を変化させることにより、HTc-SFCLT の低圧側コイルに負荷電流を通電した。次に、サイリスタスイッチを閉じて短絡電流を 5 サイクル通電 (4.2 節の限流動作試験と同じ条件) した後、サイリスタスイッチを開いた。以上のようなサイリスタスイッチのみの開閉操作に伴う負荷抵抗、高圧側コイルおよび低圧側コイルの各端子間電圧 ( $V_R, V_{HV}, V_{LV}$ )、低圧側コイル電流  $I_{LV}$  を測定した。

負荷電流  $I_{LV} = 90 A_{peak}$  ( $I_c$  の約 1.5 倍)、固有短絡電流  $I_{PRO} = 800 A_{peak}$  の場合における  $I_{LV}$  および  $V_{HV}$  の波形を Fig.4.10 に示す。同図(a) より、短絡電流の大きさおよび限流

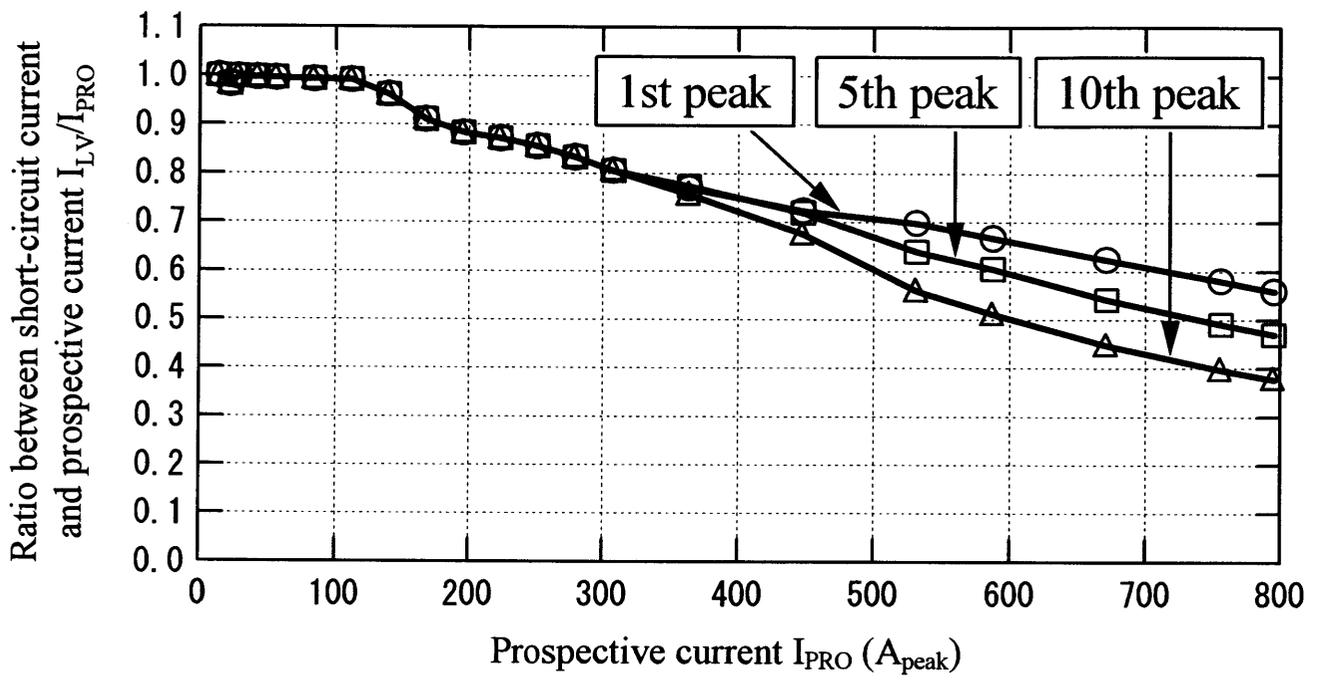


Fig.4.8 Current limiting characteristics of HTc-SFCLT in current limiting test.

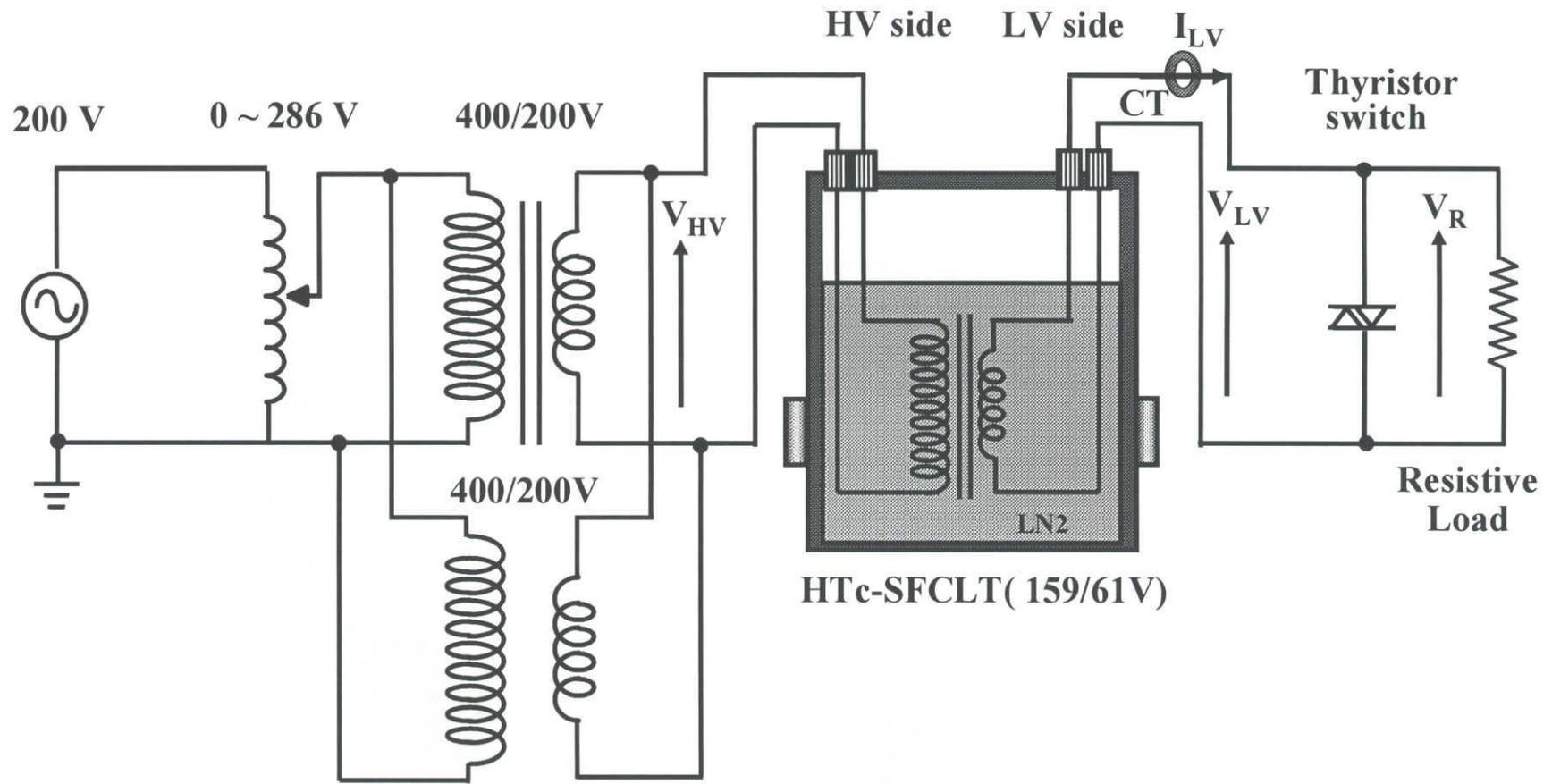


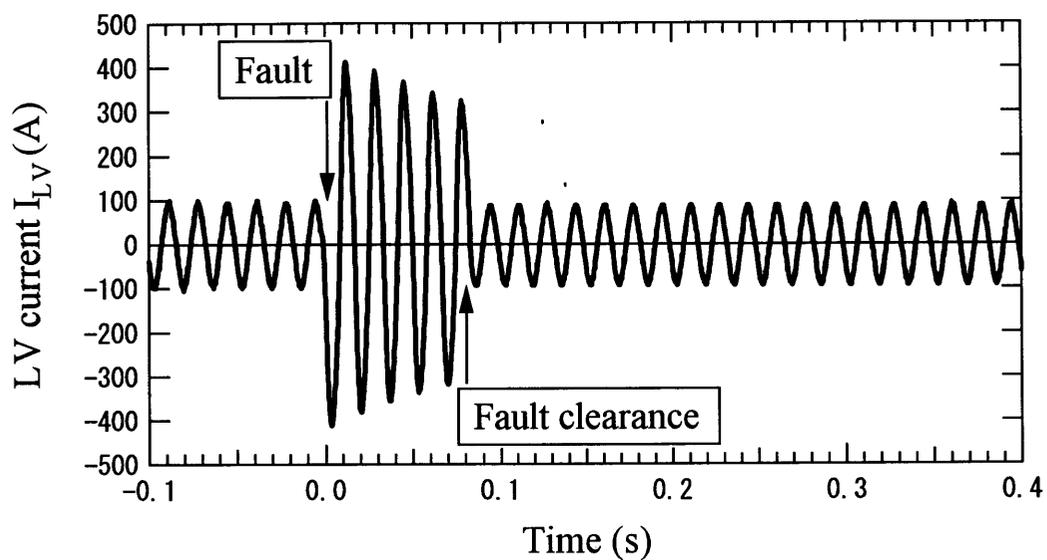
Fig.4.9 Experimental setup for recovery test of HTc-SFCLT

過程は前節の限流動作試験結果をほぼ再現しており、 $I_{LV}$  は第 1 半波において  $412A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 52%)、5 サイクル後において  $312A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 39%) まで限流されていることがわかる。その後、サイリスタスイッチを開いて故障を除去すると、 $I_{LV}$  は故障前の負荷電流を示した。すなわち、HTc-SFCLT が短絡電流を限流し、故障電流が除去された直後に、超電導状態に自己復帰したとすることができる。また、同図(b) より、短絡期間中の  $V_{HV}$  は健全時の 90%を維持しており、故障除去後の電圧動揺も小さいことがわかる。

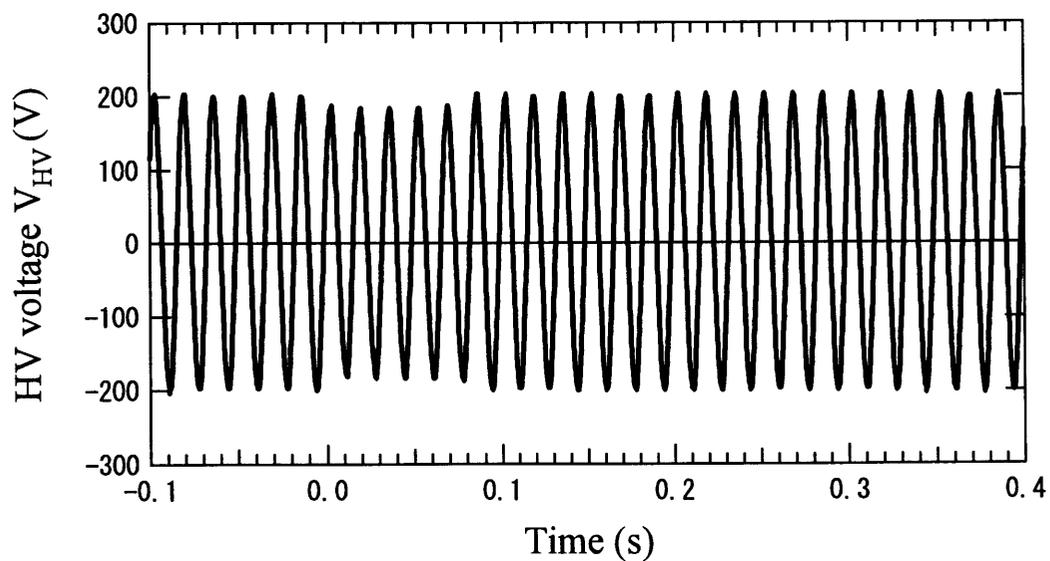
このような超電導復帰特性を検討するため、限流動作に伴う Bi2212/CuNi 複合バルク導体の温度上昇を解析した。Fig.4.10 の電流・電圧波形より、短絡電流抑制中の注入パワーおよび蓄積熱エネルギーを計算した結果を Fig.4.11 および Fig.4.12 にそれぞれ示す。両図より、限流期間の第 1 半波に最大 14kW が HTc-SFCLT に注入され、5 サイクル後には 480J の熱エネルギーが蓄積されたことがわかる。また、短絡電流抑制中の注入パワーおよび蓄積熱エネルギーの短絡電流波高値依存性を Fig.4.13 に示す。同図より、短絡電流波高値 =  $260 A_{peak}$  付近から発熱が急激に上昇することがわかる。

この蓄積熱エネルギーを断熱条件を仮定して Bi2212/CuNi 複合バルク導体の温度上昇に換算した。温度上昇の蓄積熱エネルギー依存性および短絡電流波高値依存性を Fig.4.14 に示す。Fig.4.14(a)より、温度上昇と蓄積熱エネルギーとの関係が比例関係にあることを確認した。また、Fig.4.14(b)において、 $I_{PRO}=800A_{peak}$  における 5 サイクル後の温度上昇は約 4K である。この温度上昇は大気圧液体窒素(77K)中に浸漬された Bi2212/CuNi 複合バルク導体の臨界温度(90K)に対する温度マージンよりも低いため、HTc-SFCLT は故障除去直後に超電導状態に自己復帰したものと考えられる。

以上の結果より、固有短絡電流  $I_{PRO} < 800A_{peak}$  においては、設計・製作した HTc-SFCLT が超電導限流器としての有効な限流機能および故障除去後の超電導状態への自己復帰特性を有することを検証した。



(a) Waveform of low-voltage current  $I_{LV}$



(b) Waveform of high-voltage voltage  $V_{HV}$

Fig.4.10 Recovery characteristics of HTc-SFCLT ( $I_{LV} = 444A_{peak}$ )

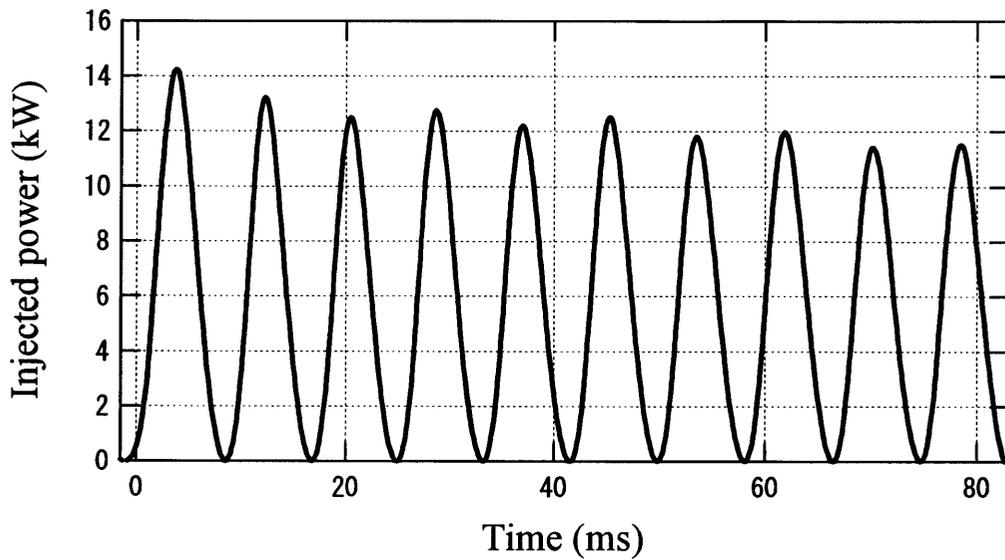


Fig.4.11 Injected power during fault current limitation ( $I_{LV} = 444A_{peak}$ ).

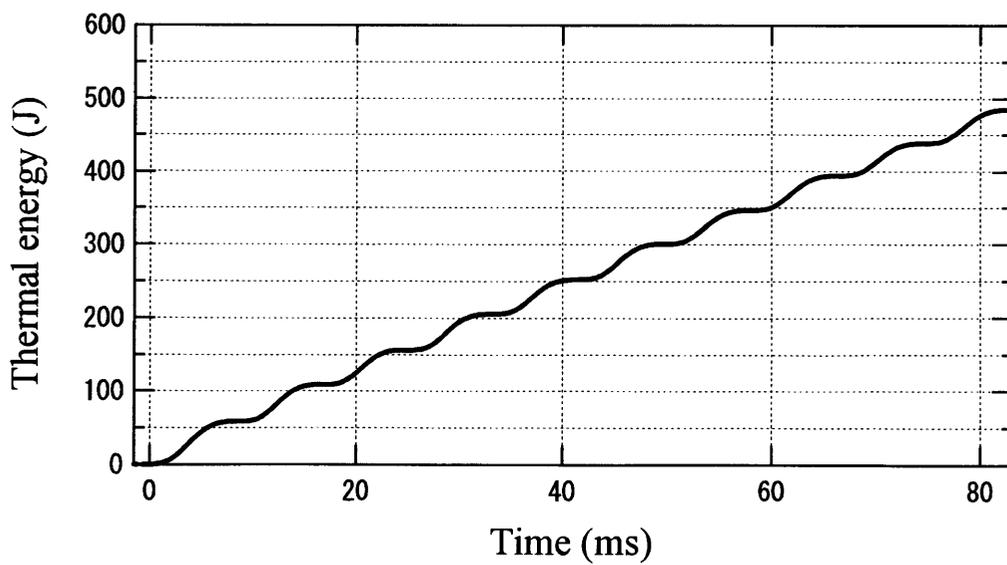
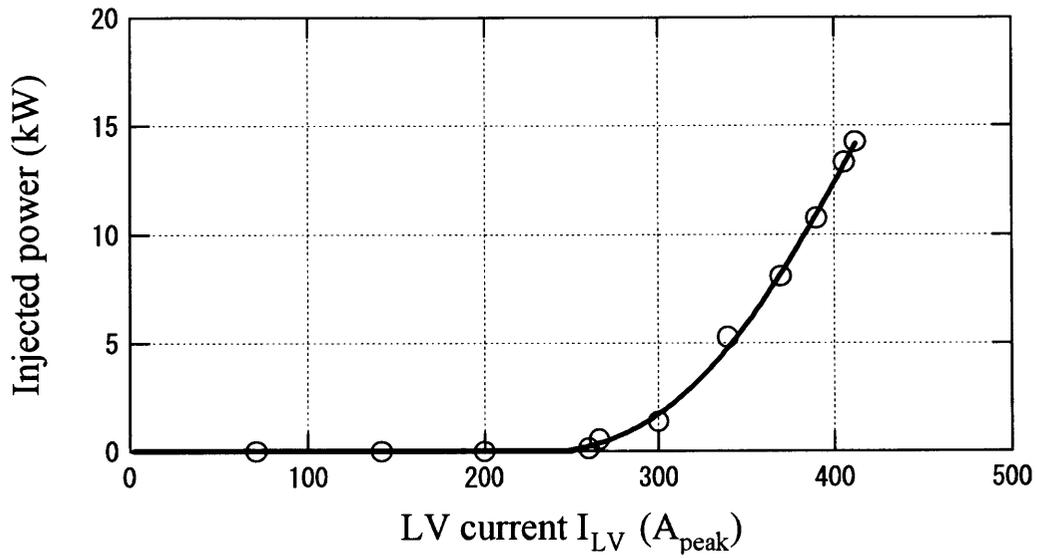
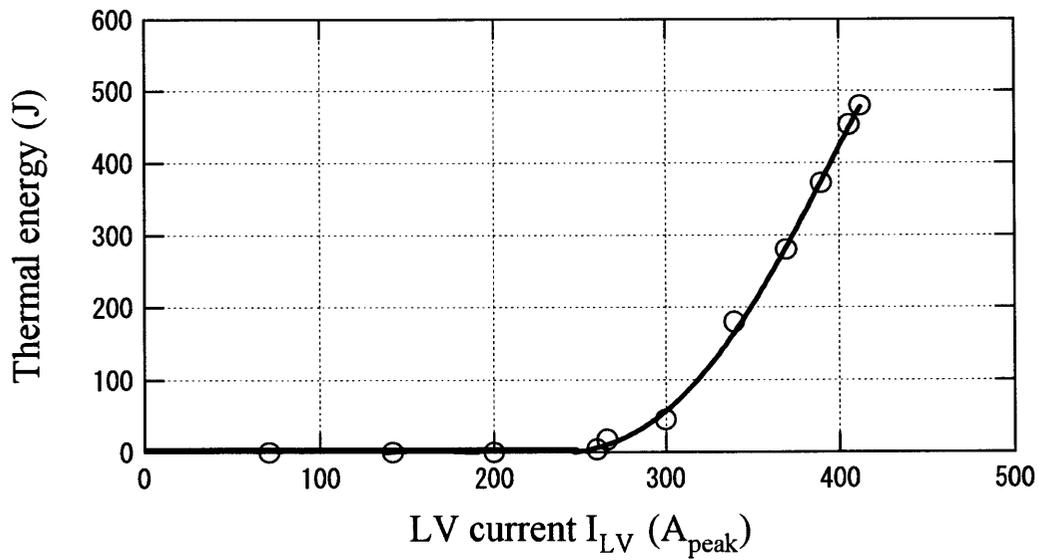


Fig.4.12 Thermal energy accumulated during fault current limitation ( $I_{LV} = 444A_{peak}$ ).

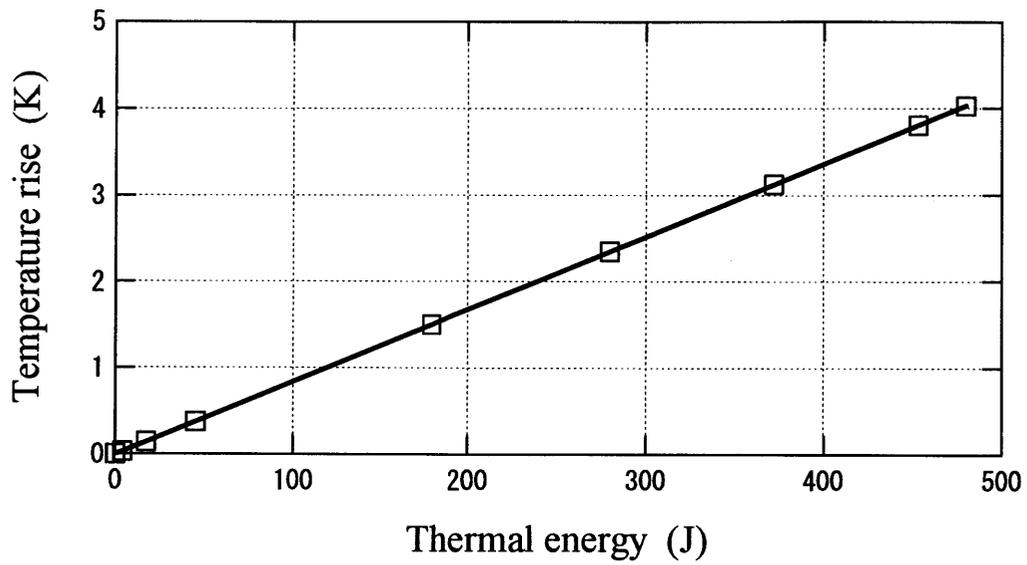


(a) Relation between injected power and low-voltage current  $I_{LV}$

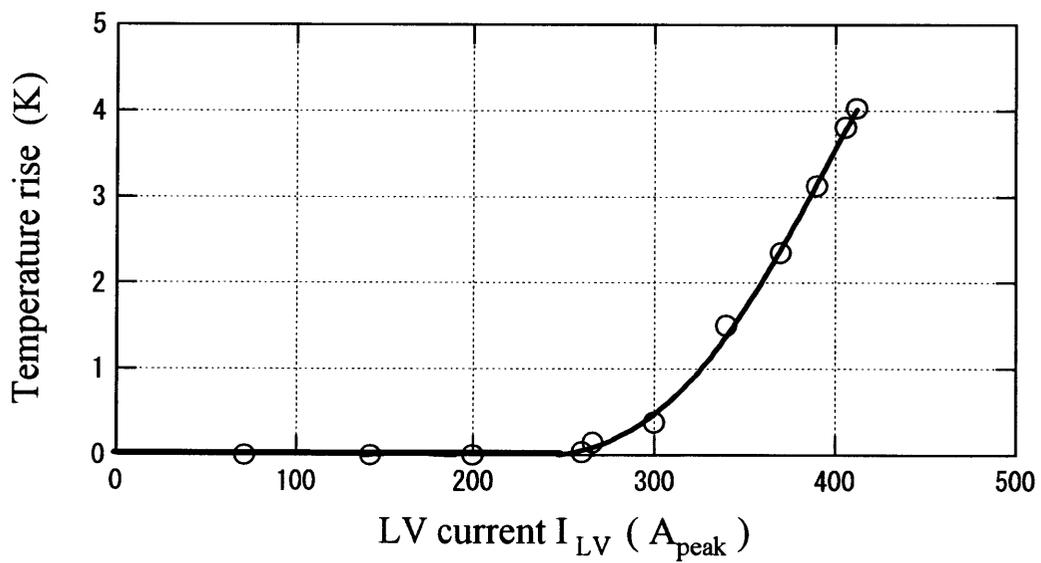


(b) Relation between thermal energy and low-voltage current  $I_{LV}$

Fig.4.13 Injected power and thermal energy as a function of low-voltage current  $I_{LV}$ .



(a) Temperature rise as a function of thermal energy



(b) Temperature rise as a function of low-voltage current  $I_{LV}$

Fig.4.14 Temperature rise during fault current limitation.

#### 4. 4 まとめ

本章では、高温超電導限流変圧器（HTc-SFCLT）の超電導限流器としての限流動作特性試験および超電導復帰特性試験を行った。その結果、以下の成果および知見が得られた。

- (1) 限流動作特性試験から、HTc-SFCLT が超電導限流器としての機能を有することを検証した。固有短絡電流波高値  $I_{PRO}=800A_{peak}$  における短絡電流は、第 1 半波において  $444A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 55%)、5 サイクル後において  $300A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 37%) まで限流できることを確認した。
- (2) 超電導復帰特性試験から、HTc-SFCLT は故障除去直後に超電導状態に自己復帰することを検証した。固有短絡電流波高値  $I_{PRO}=800A_{peak}$  における Bi2212/CuNi 複合バルク導体の温度上昇は 5 サイクル後で約 4K であり、臨界温度に対する温度マージンよりも低いことを示した。

以上の実験結果より、HTc-SFCLT の超電導限流器としての機能を検証することができた。

## 第5章 総括

### 5. 1 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT)

本研究においては、超電導電力機器と背後電力システムとの構成・運用上の協調（システムコーディネーション）の観点から、超電導変圧器に限流機能を複合化した「超電導限流変圧器（Superconducting Fault Current Limiting Transformer: SFCLT）」の実現可能性を検証することを目的とした。SFCLTの開発ステップは、PHASE-1（EMTPによるSFCLTの電力システム導入効果の解析・評価）からPHASE-2（NbTiを用いた液体ヘリウム冷却レベルの低温超電導限流変圧器（LTc-SFCLT）の設計・製作・試験）を経て、PHASE-3（高温超電導導体を用いた液体窒素冷却レベルの高温超電導限流変圧器（HTc-SFCLT）の設計・製作・試験）に移行してきた。本論文では、SFCLT開発のPHASE-3として、高温超電導限流変圧器（HTc-SFCLT）を設計・製作し、基礎特性試験によって得られた成果および知見についてまとめた。

### 5. 2 本研究で得られた成果および知見

#### 5. 2. 1 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の設計・製作

HTc-SFCLTの設計定格は、三相、6.25kVA、275V/105Vであり、単相分として定格電圧：159V/61VのHTc-SFCLTを製作した。低圧側コイルはBi2212バルク導体、高圧側コイルは銅線というハイブリッド構成であり、鉄心とともに液体窒素に浸漬冷却する。さらに、変圧器としての漏れインピーダンスは、低圧側コイルと高圧側コイルとのギャップ長を調整することにより、5～10%の範囲で可変である。また、低圧側コイルのBi2212バルク導体にはCuNiが複合されて

おり、過電流通電によるクエンチ時に Bi2212 バルク導体内のホットスポット形成を回避するとともに、十分な限流効果を期待することができる。MCP-Bi2212 バルク導体は通電電流レベル、交流損失およびクエンチ時の導体内発生電界などの点において、超電導限流器用導体として適用可能な特性を有している。同バルク導体をバイファイラコイル形状に切削加工した抵抗型超電導限流器が開発されており、77K および 65K において優れた通電・限流特性を示すことが報告されている。HTc-SFCLT では、この MCP-Bi2212 バルク導体をモノファイラコイル形状とすることによって変圧器巻線とし、過電流通電時には限流器巻線としても機能することを意図している。

## 5. 2. 2 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の基礎特性試験

2 個の低圧側コイル (コイル A, コイル B) および HTc-SFCLT の基礎特性試験を行った。その結果、低圧側要素コイルの直流臨界電流 (電界基準:  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ) として、コイル A : 57A, コイル B : 63A が得られた。また、低圧側要素コイルに交流電流を通電し、通電電流波高値および通電期間の上昇によって抵抗が発生・増大することを明らかにした。さらに、直流臨界電流の約 8 倍までの交流電流波高値に対して、発生抵抗特性を取得した。

次に、HTc-SFCLT の無負荷試験の結果、巻数比として設計値 2.61 にほぼ等しい 2.64 が得られた。さらに、定格電圧印加時において、鉄心の飽和に起因する典型的な励磁電流の変歪を確認した。HTc-SFCLT の短絡試験の結果、漏れインピーダンスとして設計値 4.98% にほぼ等しい 5.36% が得られた。また、 $I_{HV} > 70\text{A}_{\text{rms}}$  ( $I_{LV} = 258\text{A}_{\text{peak}}$ : 直流臨界電流の 4.1~4.5 倍) の大電流領域において、低圧側コイルに発生抵抗の上昇が見られた。以上の実験結果より、HTc-SFCLT の超電導変圧器としての基礎的な機能を検証するとともに、超電導限流器としての機能を見出すことができた。

### 5. 2. 3 高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の限流動作・

#### 超電導復帰特性試験

HTc-SFCLT の超電導限流器としての限流動作特性試験および超電導復帰特性試験を行った。

限流動作特性試験の結果、HTc-SFCLT が超電導限流器としての機能を有することを検証した。固有短絡電流  $I_{PRO}=800A_{peak}$  における短絡電流  $I_{LV}$  は、第 1 半波において  $444A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 55%)、5 サイクル後において  $300A_{peak}$  ( $I_{PRO}$  の 37%) まで限流できることを確認した。

超電導復帰試験の結果、HTc-SFCLT は故障除去直後に超電導状態に自己復帰することを検証した。固有短絡電流波高値  $I_{PRO}=800A_{peak}$  における Bi2212/CuNi 複合バルク導体の温度上昇は 5 サイクル後で約 4K であり、臨界温度に対する温度マージンよりも低いため、HTc-SFCLT は故障除去直後に超電導状態に自己復帰できるものと考えられる。

以上の実験結果より、HTc-SFCLT の超電導限流器としての機能を検証することができた。