固体電子工学とは？

What is “solid-state electronics”?

名古屋大学 大学院工学研究科 電子工学専攻

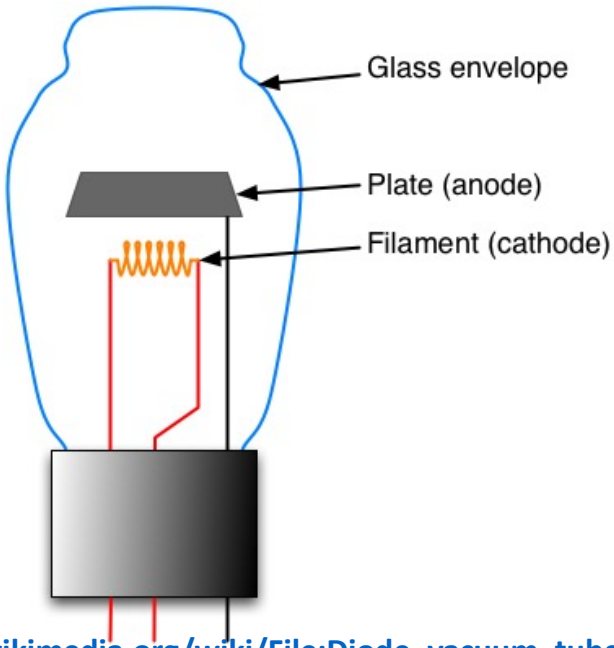
須田　淳

まずはElectronics (電子工学)

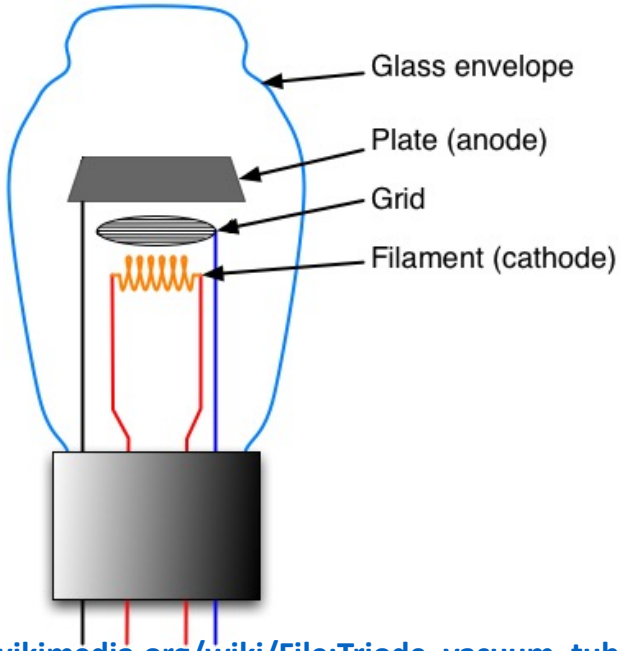
電気工学から分派　真空管の発明(1906年)で幕開け

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Elektronenroehren-auswahl.jpg

Vacuum Tube (真空管)



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diode_vacuum_tube.png



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triode_vacuum_tube.png

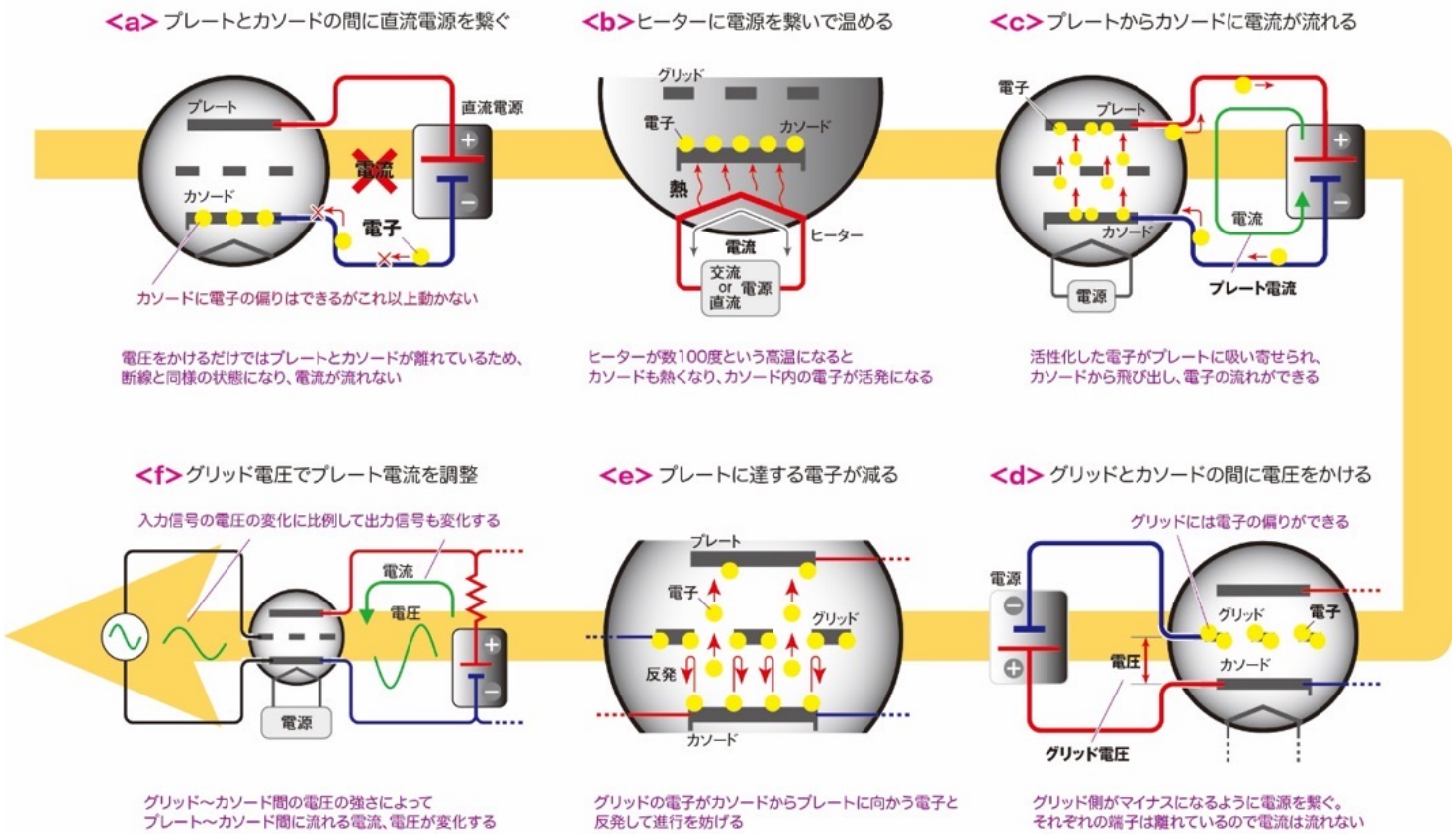
二極管:
アノード(陽極)からカソード(陰極)に
向かって一方向にしか電流が流れない
→ 整流作用

交流-直流変換(整流)
振幅変調波の復調(検波)

三極管:
アノード(陽極)からカソード(陰極)に
向かって流れる電流をグリッド電位に
より制御できる→増幅作用

信号増幅
論理回路

真空管の動作原理



出典：KORG(電子楽器メーカー)の技術解説ページ　真空管の動作原理
https://korgnutube.com/jp/tube/

金属を加熱すると電子が飛び出してくる「熱電子放出現象」が基礎
飛び出した電子は電位分布に従って運動する（古典力学）
電子がある場所からある場所に移動する＝電流が流れる

電子工学による革新

1915 アメリカ大陸横断電話回線

電話は既に実用化していたが信号減衰のため長距離回線は無理だった。
真空管を使った増幅器で多段中継することで大陸横断の電話回線が実現。

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1931_RCA_Superette_Console_Radio.jpg

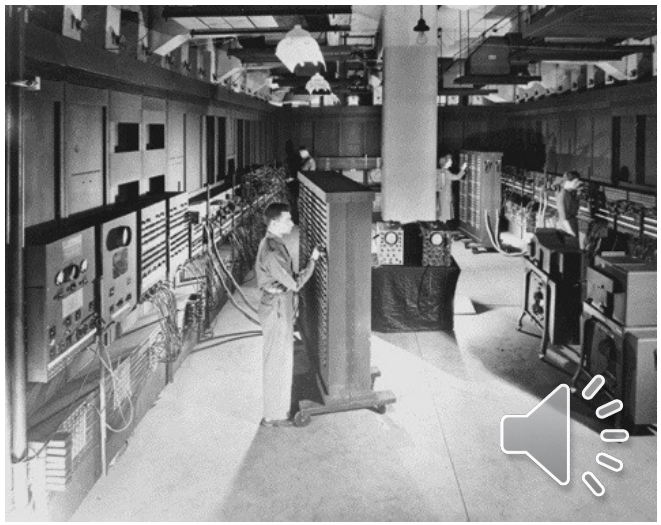
1920 アメリカで正式なラジオ放送開始

真空管を使った送信機・受信機（ラジオ）による品質の
良い音声放送が実現。各家庭に真空管ラジオが普及。

RCA Superette Console Radio (1931)

1946 電子計算機 ENIAC

リレー(継電器)や歯車、スイッチを使った電気機械式
計算機を凌駕する電子計算機の登場。18,000本を
超える真空管を用いて作られている。重量30トン、
消費電力160kW。1秒間に5000回の加減算。
従来の電気機械式の1000倍の計算速度を実現。



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Classic_shot_of_the_ENIAC.jpg

真空管による電子工学の限界

物理：熱電子放出現象を利用

高温に加熱したフィラメントが必要
→消費電力が大きい
→故障しやすい（断線）

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bandmaster_Reverb_Tube_Amp.jpg

ガラス管→割れやすい
電極構造→小型化限界あり

真空管を使った全国的な電話網、コンピューターの登場
莫大な電力消費
本数が多いので常に修理し続けなければならない状態

ENIACでは毎週2～3本の真空管を交換
(18000本のどれが故障しているか探すのも大変)

真空管から固体電子素子へ

真空→固体(半導体)の電気伝導現象を用いた整流素子・増幅素子

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bardeen_Shockley_Brattain_1948.JPG

<u>整流素子</u>　鉱石検波器

1874　金属硫化物に金属針を接触させると整流作用を示す

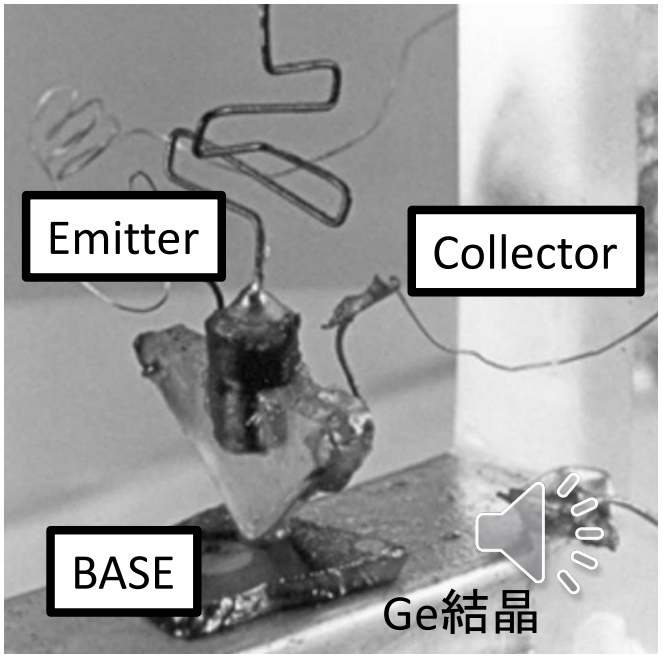
1906　単結晶を用いるとより良い整流性

1942　半導体の性質として原理が解明（ショットキー接合）

<u>増幅素子</u>

1947　Ge点接触型トランジスタの発明（発見）
バーディーン・ブラッテン・ショックレー

1948　Geバイポーラ接合トランジスター
ショックレー



https://www.computerhistory.org/siliconengine/invention-of-the-point-contact-transistor/

固体電子工学の劇的進歩

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Classic_shot_of_the_ENIAC.jpg

国家に一台

企業に一台

https://www.computerhistory.org/revolution/mainframe-computers/7/161/565

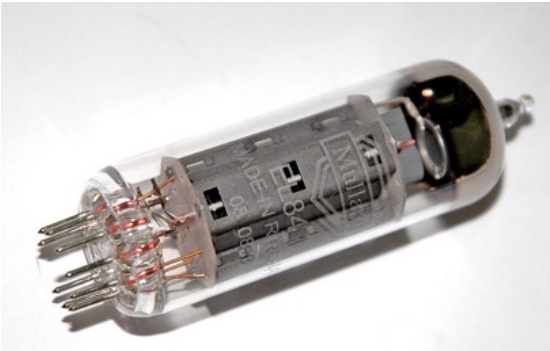
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ibm_px_xt_color.jpg

一人一台

https://www.apple.com/jp/newsroom/2020/10/apple-announces-iphone-12-and-iphone-12-mini-a-new-era-for-iphone-with-5g/

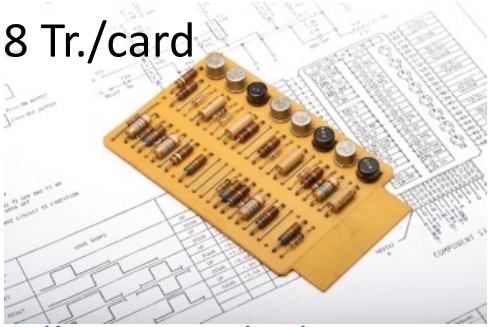
ポケットに入る

1946 1964 1981 2010



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mullard_el84_vacuum_tube.jpg

8 Tr./card



https://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Standard_Modular_System#/media/File:SMScard.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_C8086.jpg

29,000 Tr./chip

https://vi.wikipedia.org/wiki/Apple_SoC

149,000,000 Tr./chip
(iphone4)

小型軽量
フィラメント電力不要
暖気不要故障しにくい

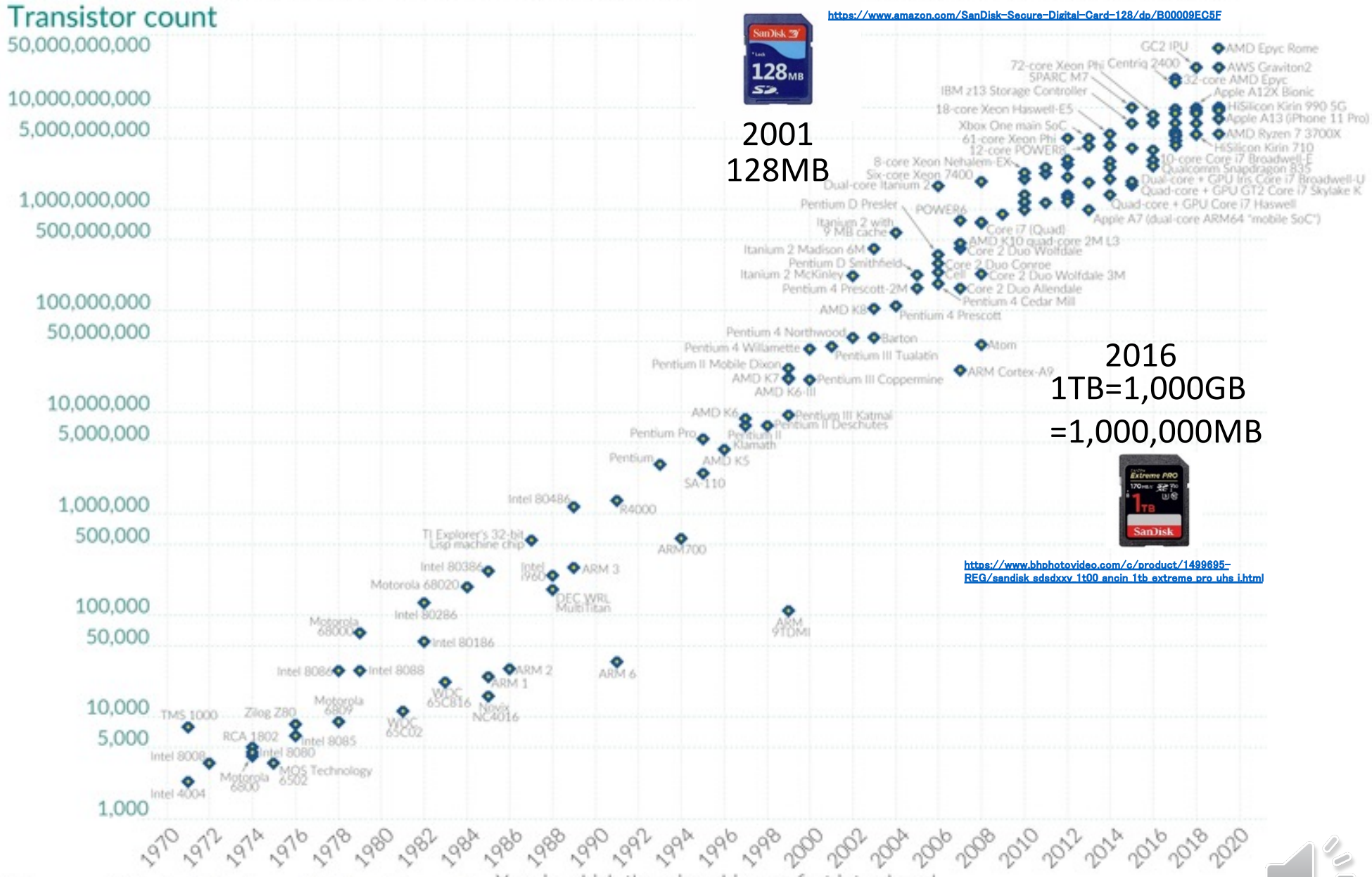
ムーアの法則:
5年ごとに集積回路上のトランジタは10倍に増える

真空管 トランジスタ 集積回路(LSI)

Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Our World in Data

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.



https://www.amazon.com/SanDisk-Secure-Digital-Card-128/dp/B00009EC5F

2001
128MB

2016
1TB=1,000GB
=1,000,000MB

https://www.bhphotovideo.com/c/product/1499695-REG/sandisk sdsdxxy 1t00 ancin 1tb extreme pro uhs i.html

Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems.

Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:›aw_Transistor_Count_1970-2020.png

半導体集積回路技術の進歩

https://museum.ipsj.or.jp/en/heritage/MCC_board_of_FACOM_VP_Series_E_models.html

スーパーコンピューター
富士通 VP400
500,000,000円
(1985年4月発売)

家庭用ゲーム機
プレイステーション・ポータブル
20,790円
(2004年12月発売)

コンピュータのけいさんくらべ

プレイステーションがなんだいあつまれば
２０年前のスーパーコンピュータにかてるかな？

① １００００だい

② １００だい

③ １０だい

④ １だい

小学生向け
ナノテク講座でのクイズ

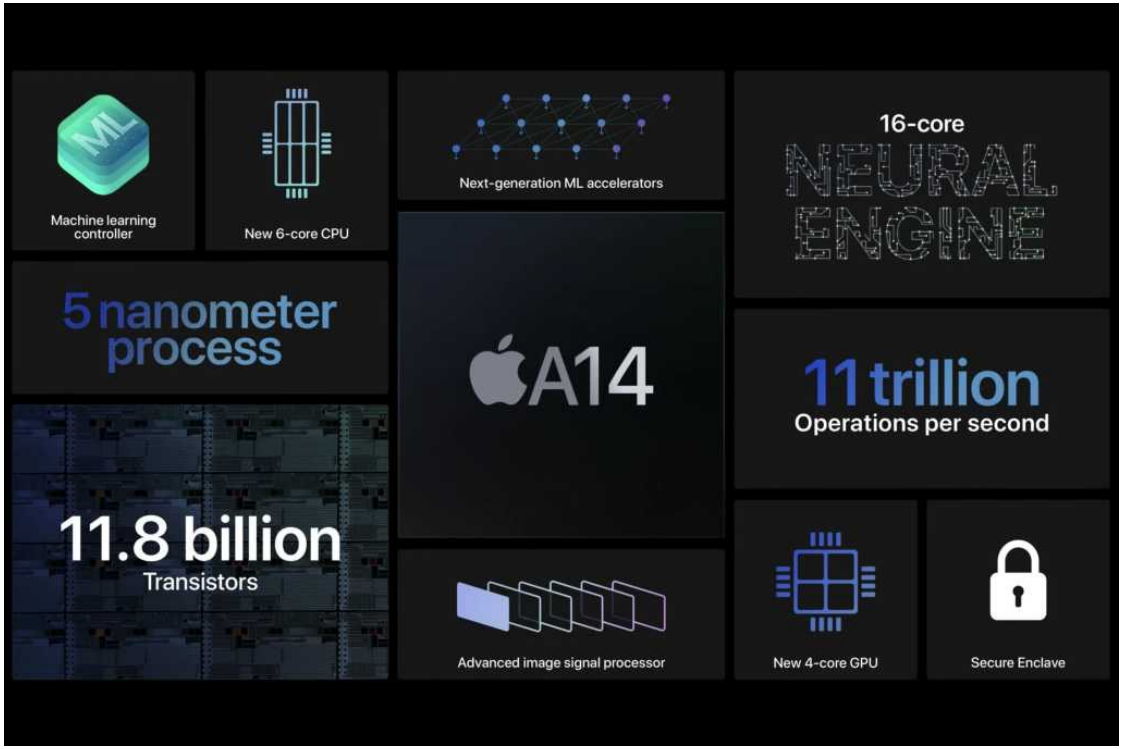
④ １だい

わずか88mm²角に118億個のトランジスタ

https://www.macworld.com/article/234595/a14-bionic-faq-performance-features-cpu-gpu-neural-engine.html

40年前の
トランジスタラジオには
5個のトランジスタ

https://www.sony.com/ja/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-b.html



最新型
iPad Air
Apple A14 Bionicプロセッサ搭載

https://www.apple.com/jp/shop/buy-ipad/ipad-air/64gb-%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%82%A4%E3%83%96%E3%83%AB%E3%83%BC-wifi

身の回りで半導体が使われているものは？

ラジオ
テレビ

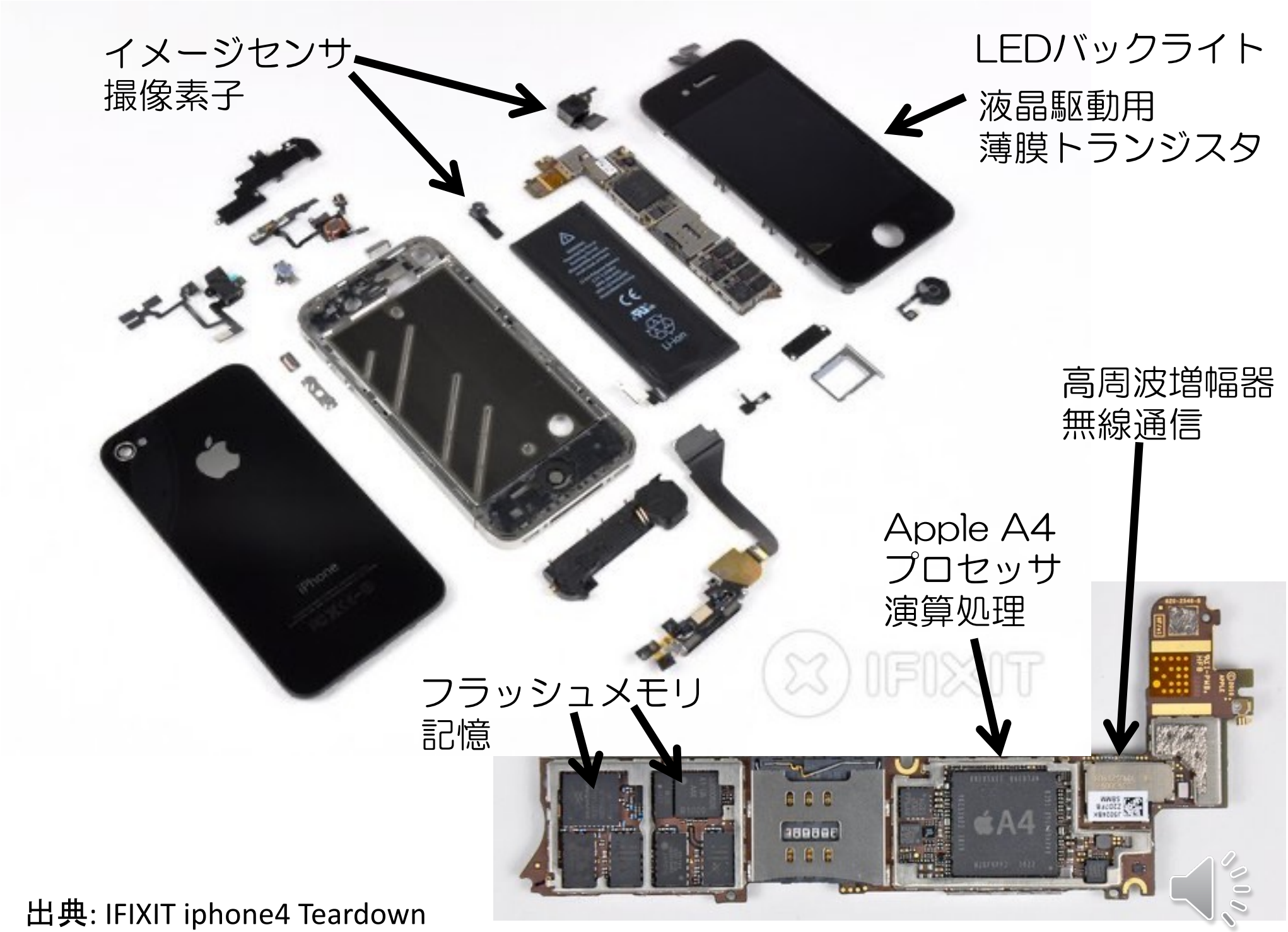
出典: ソニー 商品のあゆみ
https://www.sony.com/ja/SonyInfo/CorporateInfo/History/sonyhistory-b.html

1954 Sony TR-55

電子機器・デジタル家電：
パソコン
携帯電話
家庭用ゲーム機

https://www.apple.com/jp/shop/buy-iphone/iphone-12-pro

半導体集積回路 (IC,LSI)
一つのチップに膨大な
数のトランジスタを集積



出典: IFIXIT iphone4 Teardown
https://www.ifixit.com/Teardown/iPhone+4+Teardown/3130

社会を支える半導体

半導体なしでは現代社会は成立しない！

情報・通信分野

シリコン、トランジスタ、集積回路(IC,LSI)
DRAM、フラッシュメモリ、プロセッサ

コンピュータ
インターネット、光ファイバ通信
携帯電話、衛星放送

半導体の役割はそれだけではありません！

https://www.nikkei.com/article/DGXNASDD070FR_X00C11A9TJ0000/

太陽光発電
太陽電池は半導体そのもの
シリコン太陽電池

関西電力堺太陽光発電所

敷地面積：約21ha
太陽電池出力：約1万kW（10MW）
年間発電電力量：約1,100万kwh
（一般家庭3，000軒分相当）
太陽電池の種類：シャープ株式会社
薄膜シリコン太陽電池
太陽電池の枚数：7.4万枚

太陽熱発電

https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/5697/

太陽光を集光して
その熱でお湯を沸かして
その蒸気でタービン発電機を回す。

光→熱→蒸気→力(回転)→電気　4段階

規模が大きいと効率上がる
（小規模はあり得ない）

太陽光発電

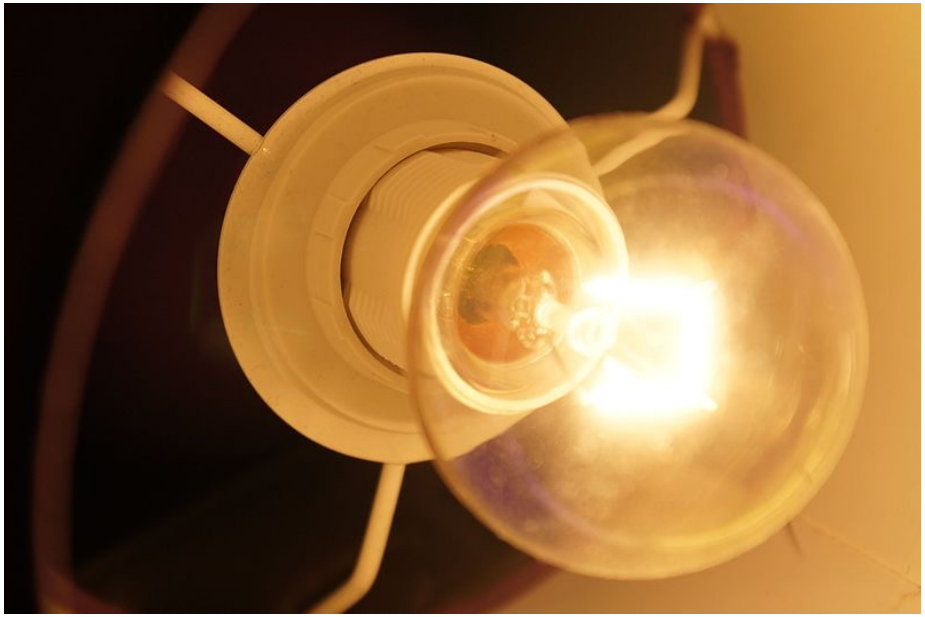
https://www.nikkei.com/article/DGXNASDD070FR_X00C11A9TJ0000/

https://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/

https://citizen.jp/shop/collection/g/gBL5495-72E/

半導体内の光と電子の相互作用を利用して
光を直接電気に変えている
小さいものも大きいものも同じ効率
可動部無し、薄型・軽量

白熱電球

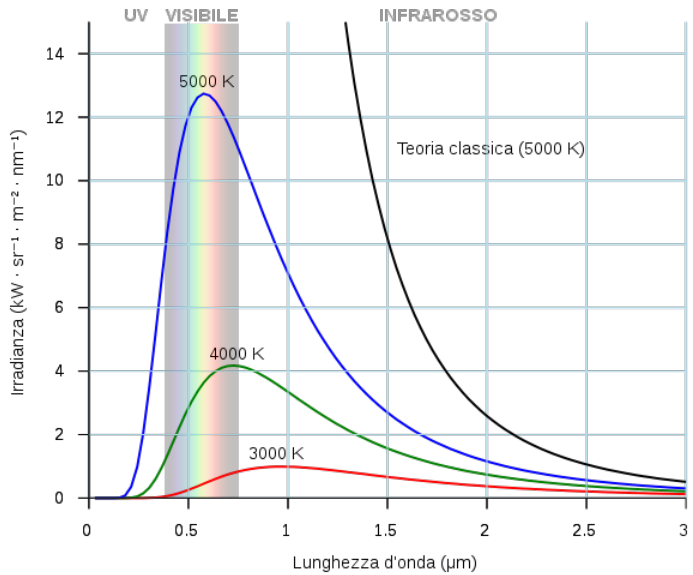


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Close-up_light_bulb_filament_1.JPG

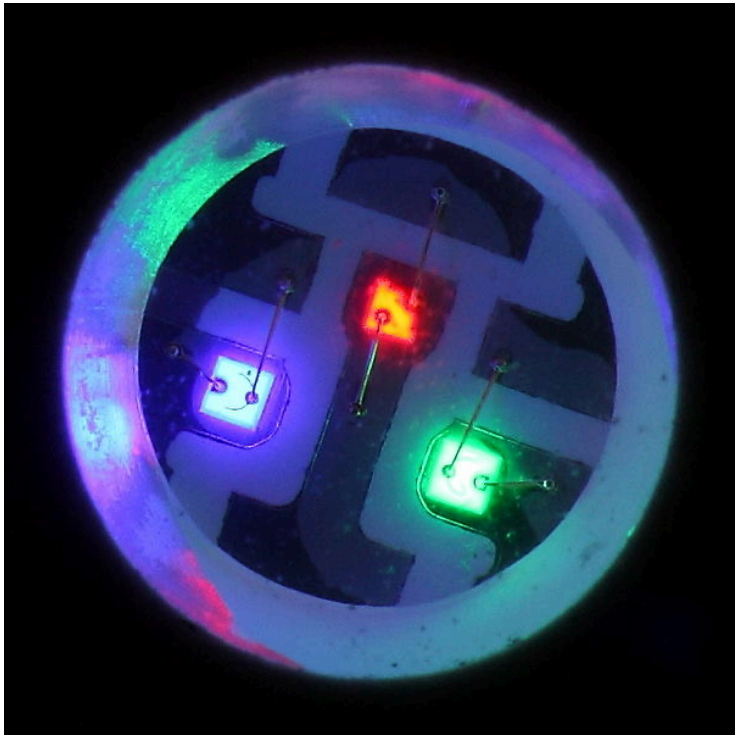
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Campfire_Pinecone.png

電気→熱→高温→黒体輻射

多量の熱
赤外線（見えない光）
　暖かいのだけど…



発光ダイオード



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB-SMD-LED.jpg

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peggy2LE_-_White_LEDs_(2230059807).jpg

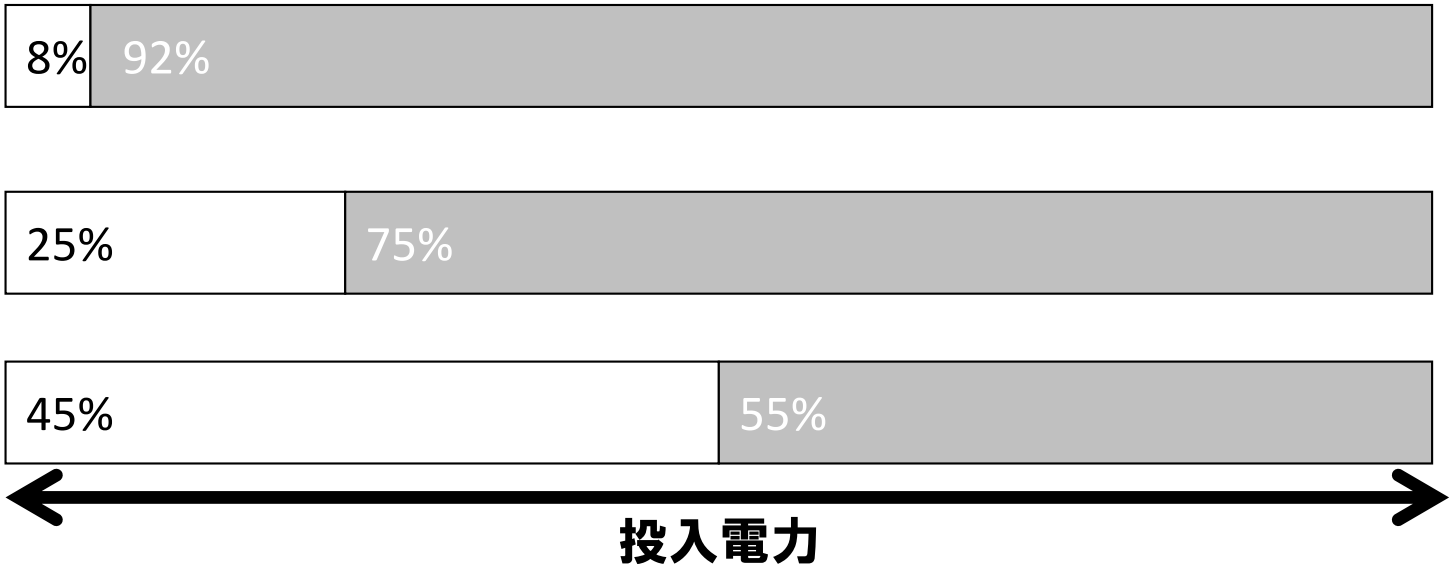
電気→光（単色光）　半導体内で電気を光に直接変換

https://www.bragitoff.com/2014/10/2014-nobel-prize-physics-blue-led/

Nobel Foundation

照明・ディスプレイ
発光ダイオード

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Close-up_light_bulb_filament_1.JPG



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:02_Spiral_CFL_Bulb_2010-03-08_(black_back).jpg

全電力消費の1/4が照明用途
その利用効率は25%でしかない

LEDは潜在的に100%近い効率を実現できる
（最先端の青色LEDの効率70%）

https://kaden.watch.impress.co.jp/cda/news/2009/02/04/3483.html

縁の下の力持ち　半導体パワーエレクトロニクス

N700系の全体像を知る

TOPに戻る

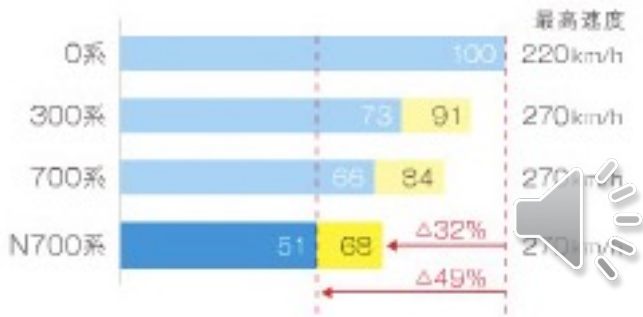
出典：JR東海環境サイトホームページより
https://eco.jr-central.co.jp/railway/

最速と省エネの両立です。

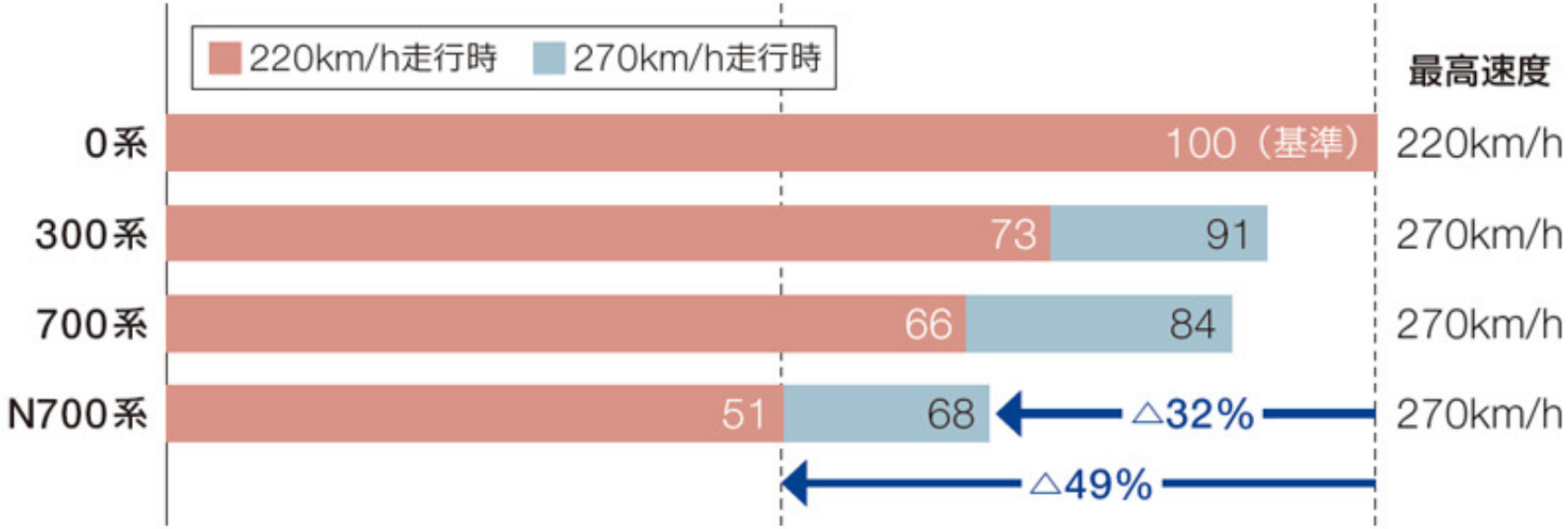
※ 新幹線の車種別電力消費量の比較（0系基準）

最新・最速・最良。N700系は、このコンセプトを基に、私たちの持てる技術のすべてをかけて開発されました。史上最速かつ、さらに快適な乗り心地。もうひとつ、私たちには達成すべき目標がありました。それは、これまでで最も地球環境への負荷を少なくすること。そのために徹底的に空気抵抗を低減させ、省エネを極限まで追求。初代新幹線（0系）より最高速度を220km/hから270km/hに向上したにもかかわらず、電力消費量は32%低減、仮に同じ220km/h走行とした場合には49%低減させ、大幅な省エネ化を実

新幹線で ECO張

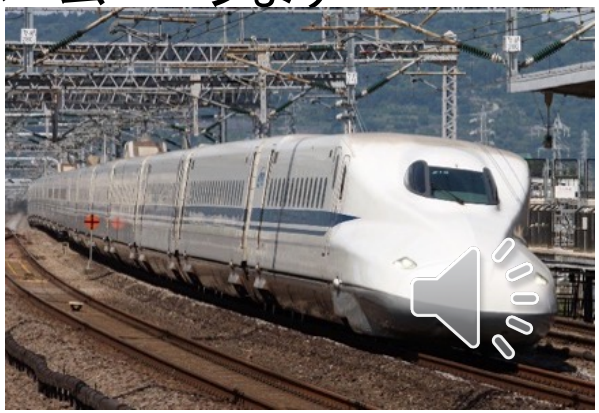


0系新幹線から N700系新幹線へ



出典: JR東海環境サイトホームページより

- 車体の軽量化
- 車体の形状（空気抵抗の低減）
- **電力変換（パワーエレクトロニクス）**



https://en.wikipedia.org/wiki/N700_Series_Shinkansen#/media/File:Shinkansen_N700_z15.jpg

新幹線電車駆動システム
Propulsion system for Shinkansen train

富士電機のパワーエレクトロニクスとシステムコントロール・テクノロジーで静粛性，高信頼性，高性能，高機能，高効率，小形・軽量，高速走行安定性に対応した新幹線電車駆動システムを実現しています。

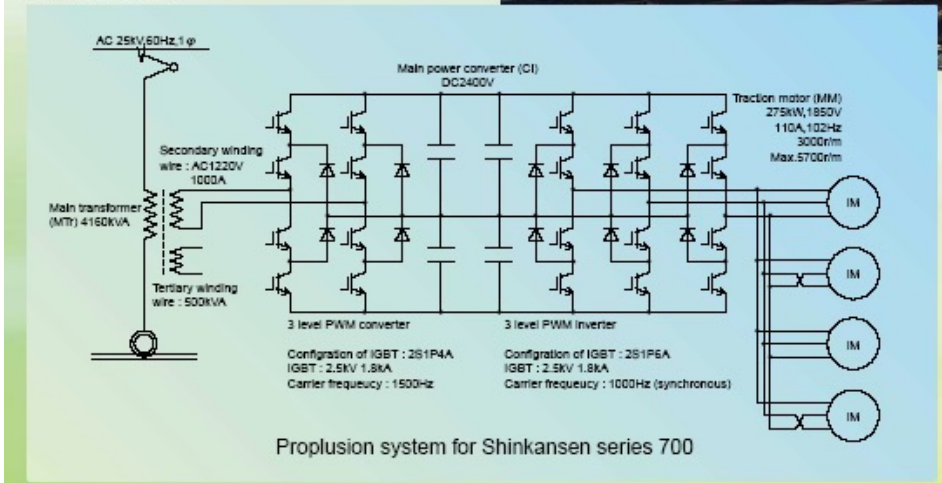
Propulsion system of Fuji Electric, which is based on the latest power electronics and system control technology, offers the following features:

- Superior performance, functions and efficiency
- Superior stability at high-speed operation
- Outstanding reliability
- Low-noise level
- Smaller size

主変圧器
Main transformer

主電動機
Traction motor

主回路システム
Main circuit system



Proplusion system for Shinkansen series 700

主変換装置
Main power converter

出典: 富士電機ホームページ　製品情報　新幹線電車用電機品
https://www.fujielectric.co.jp/products/electric_railways/pdf/WC31-11.pdf

回生ブレーキ技術

- 環境負担を減らすための
  さまざまな取り組み
- サイトマップ

アニュアルレポート

詳細はこちら

新幹線でEco出張

地球温暖化防止のためにできること。

日本民営鉄道協会

環境にやさしい交通機関、鉄道でエコキャンペーン。

N700系では、走行時の抵抗を低減させるために新たな先頭形状が生み出されました。最適な空力特性を備えたこの先頭形状は、あたかも鳥がつばさを広げて飛翔する姿に似ていることから、「エアロ・ダブルウイング形」と名づけられています。また、全周ホロの採用、台車スカートの改良といった、車体や床下など見えない部分の改善も進めました。
電力回生ブレーキとは、ブレーキ時にモーターを発電機として働かせて、運動エネルギーを電気エネルギーに換え、それを架線に戻して他の列車で再利用できるようにするシステムです。エネルギーのリサイクルを行うことにより省エネルギー化が可能となります。

JR東海は、新幹線で初めてこの電力回生ブレーキを実用化し、300系とその後の700系、N700系に搭載しました。N700系では、1編成で通常必要なブレーキ力をすべて電力回生ブレーキでまかなう方式にすることで、新幹線の一層の省エネルギー化に貢献しています。

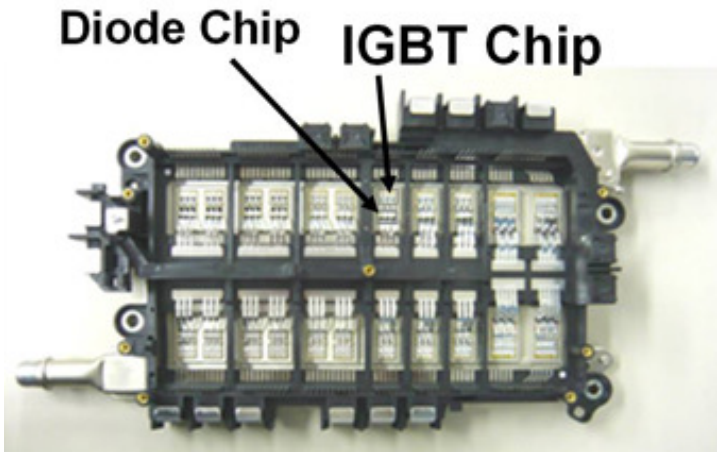
JR東海環境サイトのホームへ戻る

出典: JR東海環境サイトホームページより

電圧計
電流計
速度計
圧力計

出典：MoTA トヨタ新型 新車解説画像ギャラリー
https://autoc-one.jp/toyota/prius/newmodel-298941/photo/

半導体
パワーデバイス



出典：トヨタ企業サイト トヨタ自動車75年史
技術開発 電子
https://www.toyota.co.jp/jpn/company/history/75years/data/automotive_business/products_technology/

この授業のねらい

固体電子素子

ダイオード、トランジスタ、集積回路
発光ダイオード、レーザーダイオード
太陽電池、フォトディテクタ、イメージセンサ
パワーデバイス

これらは全て半導体デバイス

どのような原理で動くのか？
性能は何によって決まるのか？
さらなる性能向上はできるのか？

電気、電子、情報、通信

どの分野に進んだとしても、知っておいて損はない！

物質の不思議

ぜんぜんちがうのに！

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruby_gem.JPG

ルビー　　アルミニウム　さんそ
　　クロム(1%)

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sapphire_Gem.jpg

サファイア　アルミニウム　さんそ
　　てつ、チタン(1%)

アルミはく　アルミニウム

https://www.toyoalumi-ekco.jp/products/foil_cup_01/

出典: 島根県ホームページ
しまねの木炭

ダイヤ　　たんそ

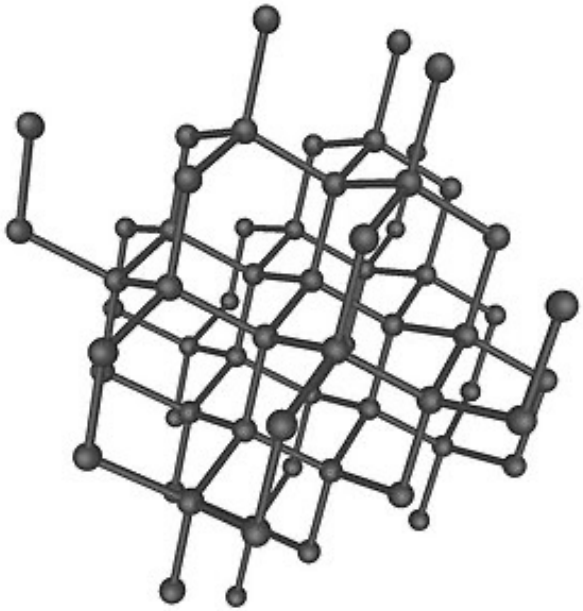
すみ　　たんそ

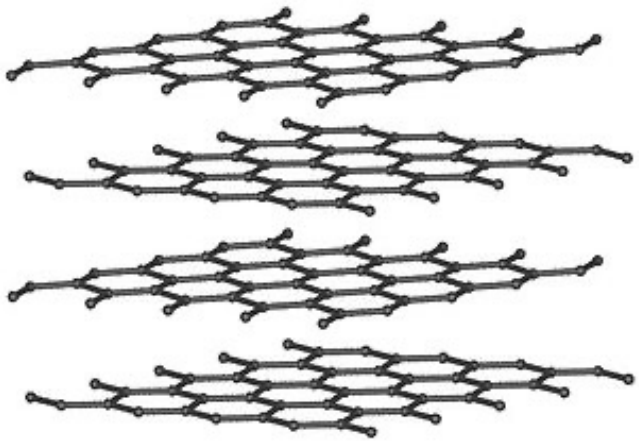
https://en.wikipedia.org/wiki/Diamond_(gemstone)#/media/File:Brillanten.jpg

「げんし」のならびかた

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond_and_graphite.jpg

まったくおなじ「たんそげんし」でできている！





ならびかたがちがうと、ぜんぜんちがうものになる

他の授業との関係

１年秋　　電磁気学I
２年春　　電磁気学II
２年秋　　量子力学及び演習

３年春　　固体電子工学
　　固体物理学の基礎、半導体の基礎

３年秋　　半導体工学
　　光半導体材料、光過程、pn接合
　　LED、レーザ、太陽電池

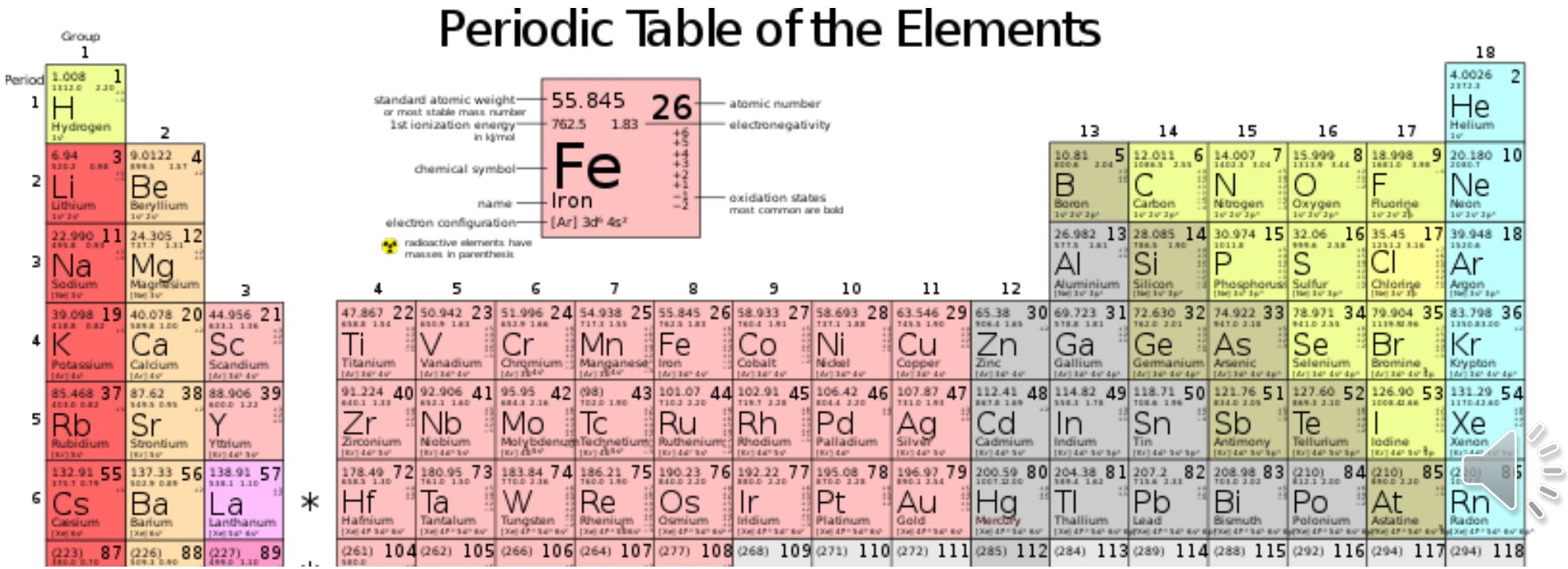
３年秋　　電子デバイス工学
　　pn接合、ダイオード、BJT、MOSFET、CMOS
　　高周波デバイス、量子効果デバイス

学習目標

金属、半導体、絶縁体は
どのような原理で決まっているのか？

Li, Mg, Al, Fe, Cuは金属。Al_2O_3は絶縁体。
Cは絶縁体? SiやGeは半導体。Snは絶縁体。
GaAsやGaN, ZnSeは半導体。

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_table_large.svg



学習目標

半導体の電気的･光学的な性質の理解

金属の電気伝導率は温度に対してわずかな変化
半導体の電気伝導率は温度に対して急激に変化する

n型伝導とp型伝導

金属は光を通さない、鏡のような反射特性
半導体の光の透過性、発光特性

半導体の性質を利用した素子(デバイス)の基本的原理

学習目標

半導体の性質を理解するために:

- 原子や分子の電子に着目した性質
- 固体のなりたち（結合様式）
- 結晶構造
- 結晶による波（X線）の回折現象
- 格子振動
- 量子力学的な固体中の電子の取り扱い
- **エネルギーバンド構造 (山場)**
- 半導体中の電子・正孔
- 半導体の電気伝導、pn接合
- 半導体の光学特性
- 半導体に磁電特性

宿題

① 真空管（2極管）の整流作用の原理を説明せよ

② 半導体のpn接合ダイオード(PNダイオード)の
整流作用の原理を説明せよ

本やネットで調べれば答えはある。

高校の物理・化学でどこまで説明できるか？
高校の知識ではどの部分の説明をごまかさないといけないか？
を意識してみましょう。