



### 3. 将来技術の紹介

浅野 克彦

(株式会社日立製作所 電力グループ日立事業所)

#### Superconducting Technology as a Gateway to Future Technology

ASANO Katsuhiko

Hitachi, Ltd. Power Systems Hitachi Works, Hitachi 317-8511, Japan

(Received 13 June 2005)

Hopes for achieving a new source of energy through nuclear fusion rest on the development of superconducting technology that is needed to make future equipments more energy efficient as well as increase their performance. Superconducting technology has made progress in a wide variety of fields, such as energy, life science, electronics, industrial use and environmental improvement. It enables the actualization of equipment that was unachievable with conventional technology, and will sustain future "IT-Based Quality Life Style", "Sustainable Environmental" and "Advanced Healthcare" society. Besides coil technology with high magnetic field performance, superconducting electronics or device technology, such as SQUID and SFQ-circuit, high temperature superconducting material and advanced cryogenics technology might be great significance in the history of nuclear fusion which requires so many wide, high and ultra technology. Superconducting technology seems to be the catalyst for a changing future society with nuclear fusion. As society changes, so will superconducting technology.

#### Keywords:

superconducting technology, nuclear fusion, superconducting coil, superconducting electronics, high temperature superconducting material, advanced cryogenics, future technology

#### 3.1 はじめに

核融合は、将来のエネルギー源としての意義以外にも、そこに至る研究開発の過程で、多くの工学分野における先端技術を牽引し多くの波及効果をもたらしてきている。一方、先端技術の開発が、未踏の性能をめざす核融合の進歩を支えてきており、お互いに相補相乗的な発展を遂げてきたといえる。核融合と超伝導工学の関わり合いも、その典型的な例であり、先端技術による大型開発が実現すると、新たな研究対象が出現し、基礎科学はまた応用工学への働きかけを行う。ブレークスルーを必須とする先端科学・技術には、このような継続的な発展関係が重要である。

核融合で適用されている超伝導技術としては、プラズマの磁場閉じ込め用や高周波源のジャイロトロン用の超伝導磁石があり、核融合の大型化・高性能化の要求とともに、超伝導コイルの強磁場化・大型化・高精度化の発展を促し、それによって、材料、極低温、電気工学などの多くの工学分野での新技術開発や新分野開拓がなされてきた。

一方、超伝導技術はこのような強磁場大型磁石のみでなく、エネルギー、医療、情報通信、環境などの幅広い分野で研究開発が進められており、技術革新の可能性を秘めた将来技術が数多く存在する。現状、核融合開発に直接的に適用されていないものでも、広範な先端技術を必要とする

author's e-mail: katsuhiko\_asano@pis.hitachi.co.jp

核融合開発の将来において、計測や解析などその周辺分野で間接的に大きな影響を与える可能性がある。本稿では、核融合開発における超伝導分野の新たな可能性と相互の発展を意識し、超伝導技術の現状や将来について言及する。

#### 3.2 超伝導技術の展望

超伝導技術は、21世紀の人類社会において重要なエネルギー、医療、情報通信、環境などの幅広い分野で、革新的な変革をもたらす可能性があることが示されてきた。わが国においても、科学技術の戦略的重点化がかかげられ、国家的・社会的課題に対応した研究開発が推進されているが、超伝導技術は、それぞれの重点分野で、積極的に研究開発が進められている。在来技術の飽和傾向に呼応して技術革新の要請も強まっている中、超伝導技術がそれを担うものと期待される。Fig. 1には、このような各技術分野にて、超伝導技術により応用展開がなされている状況を示す。超伝導技術とその応用が、人類が将来にめざす健康安心・ユビキタス・環境保全社会の実現を推進すると期待される。

Fig. 2に、年代とともに発展してきた超伝導技術とその応用を示す。極低温現象である超伝導は、微小なエネルギー処理での応用が期待され、スイッチ素子(クライオトロン)が最初に考えられたが、実用化に至らなかった。そ

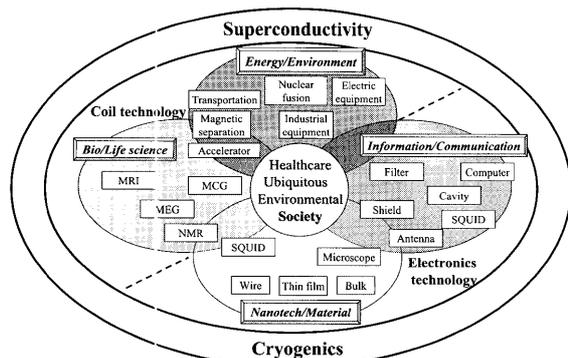


Fig. 1 Application of superconducting technology.

Table 1 Characteristics of superconducting application.

Field	Energy/Industry	Electronics
Dawn of technology	Nb <sub>3</sub> Sn material (1961)	Josephson effect (1962)
Characteristics	High magnetic field, Large electric current	Weak signal
Typical index	Magnetic field, Electric current, Stored energy	Sensitivity, Power consumption, Switching time
Typical form	Magnet, Power-line	SQUID, SFQ-circuit
Material	Wire, Bulk	Film
Typical application	Nuclear fusion, Accelerator, Electric equipment	Filter, Antenna, Computer

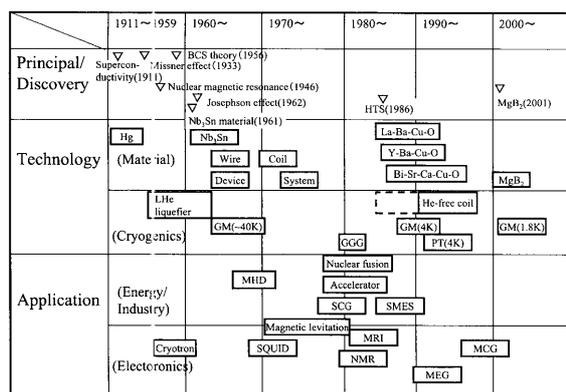


Fig. 2 History of superconducting technology.

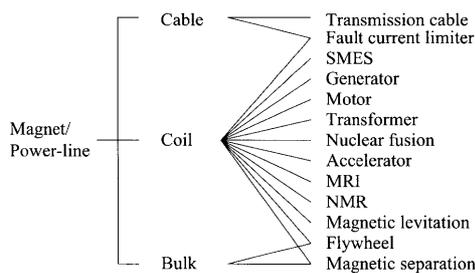


Fig. 3 Classification of superconducting application(electronic & industry).

の後、強磁場超伝導体 Nb<sub>3</sub>Sn の発見から超伝導コイルによる磁場発生装置の電力・産業応用への展開と、ジョセフソン効果の発見から SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) の開発による超伝導エレクトロニクスへの応用展開と、2つの対極的な潮流にて、超伝導技術は発展してきた。大電力・産業への応用と、微小信号を対象とした超伝導エレクトロニクスという両極端な応用といえるが、それぞれの特徴の概略を Table 1 に示す。代表的な応用例を整理して、それぞれ Fig. 3, Fig. 4 に示す。さらに技術動向という観点で、前者については超伝導磁石の大型化と高磁場化、後者については超伝導デバイスの集積度と高速化という指標で整理して、それぞれ Fig. 5, Fig. 6 [1] に示す。核融合で要求される超伝導磁石のさらなる大型化には、材料と構造を主体とした開発が必要である。超伝導デバイスでは、1986年の酸化物超伝導体による高温超伝導の発見にて開発が加速し、実用化への期待が大きい。また超流動冷却技術や小型冷凍機の開発が進んだことも、こういった磁石やデバイスの発展において見逃せない。

以下、各応用分野における超伝導の現状と将来技術を、代表的な例をあげて紹介する。

### 3.3 ライフサイエンス、バイオメディカル分野

#### 3.3.1 概要

超伝導技術の民生用としての実用化がもっとも進んでいる分野であり、核磁気共鳴や生体磁気検出技術を利用している。磁場強度とその応用との関係を、Fig. 7 に示す。核磁気共鳴を利用する MRI (Magnetic Resonance Imaging) や

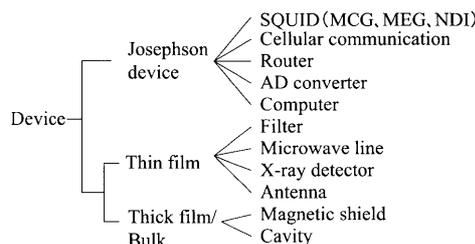


Fig. 4 Classification of superconducting application(electronics).

NMR (Nuclear Magnetic Resonance) では 1~20 T (テスラ) に及ぶ強磁場を ppm から ppb オーダの高均一度空間として生成する技術が、また生体磁気検出を行う SQUID では地球磁場の 8 桁程度も小さい 10<sup>-13</sup> T までの微小磁場を検出する超高感度磁気計測技術が、この分野の基礎技術となっている。また、実運用に必要な永久電流を実現する超伝導接続技術、低熱侵入技術、高性能冷凍機技術、磁気シールド技術なども必須の技術として開発されている。

#### 3.3.2 応用の現状と将来

##### ① MRI (Magnetic Resonance Imaging)

核磁気共鳴の発見(1946年)以来、画像化技術(70年代)、人体の断面画像(80年代初頭)、医療診断装置(撮像技術、磁石技術高度化)と発展し、さらにより高い分解能を実現するために超伝導磁石による高磁場、均一磁場が必須となっている。高磁場化(トンネル型 3 T など)とオープン化(垂直磁場システム 1.0 T, 超薄型水平磁場システム)が時代の要請であり、超伝導磁石による磁場形成技術は解析技術とともに高度化してきている。局部診断や動物用ではさらに高磁場の MRI が開発されており、実験動物 MRI で

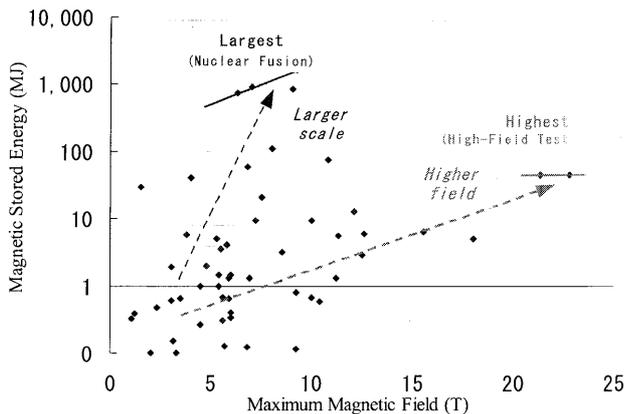


Fig. 5 Development of superconducting magnet.

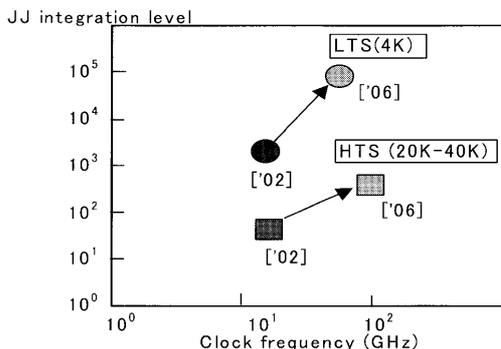


Fig. 6 Development of superconducting device (SFQ).

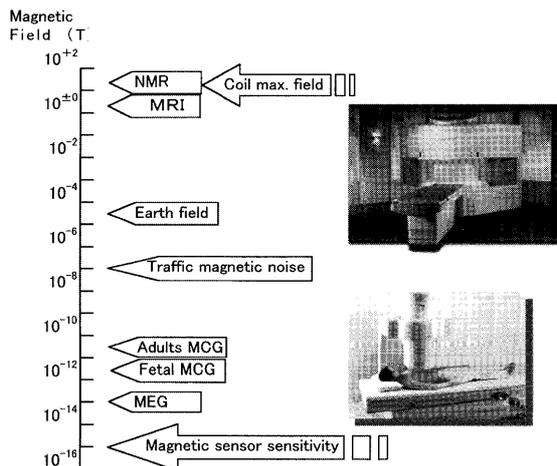


Fig. 7 Magnetic field strength and sensitivity.

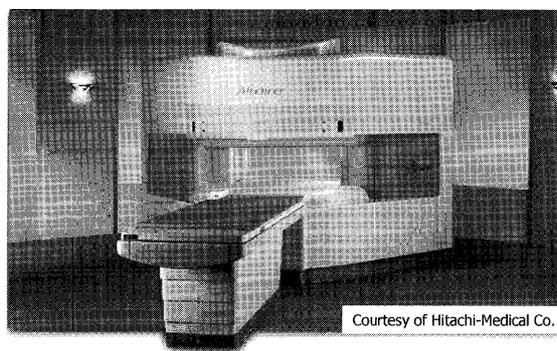


Fig. 8 Photograph of the Open-MRI (0.7T).

は、既に 7 T (セルフシールド型) が実現している。また血液中に含まれるヘモグロビンの酸素結合の状態における磁化率変化を画像化する方法として、脳内の血流量などの変化により得られる MRI 信号の変化を画像化する f-MRI (functional MRI) も開発され、体内の脳や神経系の高次機能の分析に利用されている。装置の例として、患者の閉塞感を解消し、分解能などの性能に優れたオープン型超伝導 MRI の外観を Fig. 8 に示す。

超伝導技術としては、超伝導コイルは NbTi が主体で、高磁場化、高均一度化技術以外に、永久電流運転を可能とする超伝導接続技術、低熱侵入技術、低振動技術などが必要である。システムの軽量化や小型化、また操作性向上などのために小型冷凍機や直冷式超伝導磁石技術などが MRI の普及に貢献している。将来的には、NbTi 以外の新金属系超伝導材や酸化物系超伝導材による 10 T 級 MRI システムの開発などが期待される。

(2) SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)

人体では、生命活動を維持するための電気的な活動に伴う磁場、いわゆる生体磁気が発生しているが、この微弱な磁気信号を検出することで、脳や心臓の活動をみて医療診断を行うことができる。磁気信号検出には、SQUID (超伝導量子干渉素子) と呼ばれる磁気センサを使用するが、これは一つあるいは二つのジョセフソン接合からなり、ジョセフソン接合は極薄の絶縁層または常伝導層を超伝導層で挟むことで構成されている。このループに加えられる最大

超伝導電流値は、ループの中に閉じ込められた磁束により変化するが、この変化は磁束量子単位 ( $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$  Wb) の周期的変化となり、非常に微弱な磁気に応答する特性を利用し、超高感度磁気センサとすることができる。

SQUID の開発当初はノイズレベルが高く、実用化に難点があったが、現在の感度特性は高温超伝導 SQUID で  $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  程度になっている。医療用として、脳磁計 (MEG)、心磁計 (MCG) が実用化され、肺磁計、さらにはメンタルケア診断、高感度抗原検知、遺伝子操作検知といった応用が考えられている。医療用以外にも、物理計測、非破壊検査、地質調査などに利用されている。医療用には主に低温超伝導 SQUID が利用され、高温超伝導は、感度が一桁低い液体窒素での簡便性があり非破壊検査や地質調査など、主に医療用以外で利用されている。(3.7 節参照)

ここでは一例として、心磁計を例にとり、その基本技術を紹介する。心臓は体全体に血液を循環させるために、収縮と弛緩を繰り返すが、これにより心筋の電気的興奮がある。電位を計測する手段として心電計が、磁気を計測する手段として心磁計が開発されたが、前者が臓器の誘電率の違いによって誤差を生じるのに対して、後者は、透磁率がほぼ一定のため波形歪が少なく空間分解能に優れている。また心磁図計測では、電極を貼る必要がないため計測も簡便である。基本技術としては、心磁図磁場強度が地球磁場より 5 桁 ~ 7 桁小さいので、まず磁気シールドが必要で、その内部に磁気センサーを配置して測定を行う。磁気

シールドは、超伝導シールドも開発されているが、通常、鉄ニッケル合金である高透磁率のパーマロイを使用し、地磁気の約3桁(60 dB)ほどの遮蔽を可能にし、さらに必要となる磁気遮蔽は、磁気センサーや回路に工夫を施して計測を可能としている[3]。実用化されている装置の例をFig. 9に示す。今後、心疾患診断技術としての普及と共に、装置技術としての高性能や小型化、心臓電流分布の3次元画像化技術などの開発が進められていくと考えられる。

### (3) NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

外部磁場中での核スピンのゼーマン分裂に相応した高周波磁場を印可してその共鳴現象を観測する核磁気共鳴(NMR)は、医療分野のMRIのみならず、物理、化学、生物などのほとんどすべての自然科学の分野で、ミクロな世界の精密なデータを提供する非常に重要な実験手段となっている。その原理と基礎的な実験技術は既に確立され、原子、分子、液体および固体の様々な研究に応用されている。固体物性の研究においては、NMRから得られる情報は、各原子核位置での局所的な磁化率であり、その大きな特徴は、物質内の内部磁場といった静的な情報だけではなく、緩和現象の測定を通じて電子や電子の担う磁気モーメントの運動といった動的な情報を同時に得られるところにある。特に超伝導や磁性を対象とした研究では、超伝導対の対称性やギャップの異方性の決定、また磁気秩序の有無や磁気構造の同定などに大いに威力を発揮しており、物質をミクロな立場から理解できるという意味において、その物性研究に欠くことができない実験手段である。タンパク質の構造、機能解析に使われるNMRは、特に高磁場・高周波数が必要である。高磁場という観点では、全超伝導の磁石システムで23.4 T[4]、常伝導磁石との組合せ(ハイブリッド)では、米国で45.1 T、国内でも37.9 Tが達成されている[5]。NMRスペクトロメータとしては世界最高磁場(21.9 T)にて930 MHzハイエンド機が稼動している[6]。

今後は、高感度と高分解能に対応する高磁場化技術や極低温センサ技術の開発が進められ、ハイエンド機として、永久電流運転が可能な酸化物超伝導材料等を使用した25 T級超伝導磁石や1 GHz超級NMRスペクトロメータの開発が期待される。超伝導技術としては、強磁場・高均一度化のためのコイル配置解析技術や高性能超伝導材、超流動ヘリウム冷却技術、高機能アンテナのための超伝導材(YBCO, MgB<sub>2</sub>)などの開発が考えられる。

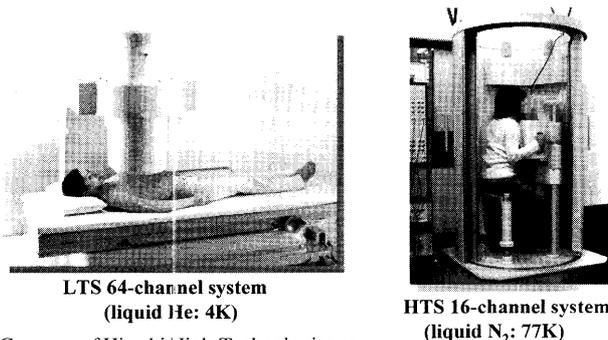


Fig. 9 Photographs of the MCG system.

### (4) 次世代薬剤配送システム

薬剤配送システム(DDS: Drug Delivery System)において、外部磁場を利用したMT(Magnetically Targeted)DDSが次世代DDSとして注目されている。遺伝子治療のために遺伝子を配送するためのベクタを配送する上で、磁気力と血流によるドラッグ力の関係から40 T/mの磁気勾配が必要との検討がされており[7]、超伝導磁石が必須となる。

### (5) 血管内有害物質排出療法[8]

血管内に混入した放射性元素や毒物などの有害物質を体外に排出する方法の一つとして磁気分離技術の適用が検討されており、永久磁石による分離実験も実施されている[8]。今後、有害物質捕捉の磁性粒子や分離効率、分離時間の研究開発とともに、バルク体などによる超伝導磁気分離システム適用の可能性が期待される。

## 3.4 情報通信

### 3.4.1 概要

通信、情報、計測の分野で、半導体の登場が大きな変革を導いたように、超伝導エレクトロニクスによる技術開発の進展は、それ以上の大きな変革を期待させる。

超伝導現象をエレクトロニクスに応用しようとした最初の試みは超伝導スイッチで、臨界温度近くでの常伝導転移による抵抗発生を利用した素子であったが、半導体素子を越えられず実用化にはならなかった。その後、ジョセフソン効果の発見からSQUID素子の開発と続き、さらに高温超伝導体の発見で超伝導エレクトロニクスの研究開発が加速され、超伝導フィルタなどの実用化が進んでいる。

単一磁束量子回路(SFQ: Single Flux Quantum)によるデジタルシステム用超伝導素子は、半導体素子に比べて、動作速度で約3桁速く、消費電力でも約3桁低いという画期的な特性をもつ。SFQの原理をFig. 10に示す。最近のデバイス技術の進展として、Nb系の低温デバイスでは、多層化(9層)と高集積化(百万素子)が実現し、高速ルーター用の4×4スイッチが40 GHzで動作することが立証されている[9]。一方、高温デバイスでは高速化(~100 GHz)が進んでいる。

### 3.4.2 応用の現状と将来

#### 1) 超高速コンピュータ

超高速の量子コンピュータは従来のコンピュータでは数兆年かかる演算を数10分で可能にする夢の計算機である。ジョセフソン素子を超高速演算素子として使い、電圧状態と超伝導状態の切り替えによるラッチ型論理回路にて超高速コンピュータを作る試みは1970年代前半から始まったが、クロック周波数を上げることに限界が出てきた。これに呼応して、SFQ論理回路を適用する研究開発が1990年代から活発化し、デバイス素子として100 GHz級による次世代高速デジタル回路にて、半導体トランジスタでは実現不可能な超高速動作の実現が期待されている。

#### 2) フィルタ

マルチメディア化の進展が、周波数の有効活用技術や大容量デジタル情報高速通信技術などを加速している。高温超伝導薄膜を適用したフィルタサブシステムは、低損失、

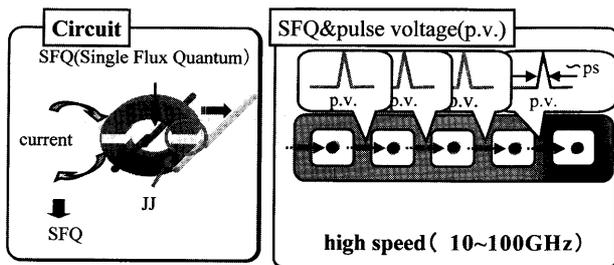


Fig. 10 Principal of the SFQ (Single Flux Quantum).

低雑音効果により受信感度が格段に向上できる。米国で実用化されており、携帯電話（850 MHz 帯）の基地局用受信装置に適用されている[10]。フィルタサブシステムは損失を小さくするためアンテナ直下に設置されるので、小型軽量化、長寿命が求められる。超伝導薄膜の特性向上とともに、冷凍機の高性能化・高機能化は重要であり、スターリング冷凍機やパルス管冷凍機が適用されている。低損失、高い周波数選択性の特徴から、他にも、ノイズ除去システムとしてのパラボラアンテナ前段への組み込みや、計測器の感度向上をめざした開発が進められている。

### (3) アンテナ

アンテナもしくは回路において、信号の送受信に共振現象を応用しているが、超伝導薄膜を適用することで、鋭い共振ピークをもった極めて優れた特性が得られる。バイオ分野でのNMR応用のアンテナとして、Y系や $MgB_2$ を薄膜化した高周波アンテナ素子が開発されており、従来の常伝導体によるアンテナに比べて10倍以上の鋭い共振特性を達成しており[11]、今後、実用化が期待される。

## 3.5 環境

### 3.5.1 概要

環境分野への超伝導の応用としては、水圏浄化と $CO_2$ 削減に寄与する交通関係や自然エネルギーとの連繋技術がある。水圏浄化は磁気分離技術の適用開発が進められ、超伝導コイルやバルク体が利用されている。交通関係は、磁気浮上や電磁推進船に超伝導コイルが軽量化の要請とともに使用され、自然エネルギーとの連繋ではそのエネルギーを超伝導電力貯蔵(SMES)やフライホイールにて貯蔵することが考えられ、超伝導コイルやバルク体が応用される。

超伝導磁石として機能する代表的なバルク材料は、RE-Ba-Cu-O (RE: 希土類元素)系であり、磁石として機能する原理は誘導電流による磁場捕捉である。捕捉磁場の大きさ/バルクの高性能化には、臨界電流の向上と試料の大型化が必要となる。また強磁場捕捉の際、電磁力による材料破壊や磁石のクエンチの問題もあり、機械的特性や低温安定性の向上策が開発研究されている。現在、Y-Ba-Cu-Oで直径25 mm, 29 Kで17 Tの捕捉磁場が達成されている[12]。永久磁石に比べて圧倒的に高い磁場が達成できるので、コンパクト化とともに出力を大きくすることも可能で、また超伝導コイルと異なり、限られた面積で強磁場を発生でき且つ磁気勾配も大きくできるので磁気分離などに応用されている。

### 3.5.2 応用の現状と将来

#### (1) 磁気分離

超伝導コイルやバルク体による磁場を利用して、原油や汚泥に磁性粉を添加して磁力で回収する技術・装置が開発されている。事故で流出した重油の回収や湖沼のアオコ除去、下水や工業排水の浄化、バラスト水の浄化など、環境浄化を目的とするさまざまな応用が検討されている。技術的には、超伝導コイルや高温超伝導バルク体、冷凍機冷却技術などが使われている。水浄化用磁気分離技術の例では、磁場レベルで3 T, 水処理能力は100トン/日のシステムが開発されている[13]。Fig. 11にフロー図の例を示す。

磁気力は、磁気勾配と磁場の積で決まるが、コンパクト化のためには、大きな磁気勾配が得られるバルクが有効である。一方、大きな処理能力が必要な場合は、大空間に磁場を発生する超伝導コイルのシステムが効果的である。

今後は、高温超伝導材料による高磁場化や冷凍機技術の高度化により、環境保全、環境修復、資源有効利用技術としての広い応用をめざしていくと考えられる。

#### (2) 磁気クロマトグラフィ技術の開発

従来分離が困難であった弱磁性並びに常磁性物質や粒子に対して、高勾配磁場による磁気クロマトグラフィ技術の開発が進められている[14]。マクロ分子分離技術、微小粒子分離技術、常磁性イオン分離技術等として確立することが期待される。

#### (3) 超伝導磁気シールド

生体反応には微小電流や極微弱磁場が存在し、人体やデジタルデバイスを磁場環境から保護することや、逆に強磁場を利用する要請においては、同様に磁場環境からこれを保護することが重要な技術となる。酸化物超伝導容器やコイルによる磁気シールドは高いシールド性能とともにコンパクト化も実現するものとして期待が大きい。また広く地球環境並びに生活環境における磁気、電磁波、2次宇宙線、中性子線などに対して、SQUID、超伝導フィルタなどの超伝導検出器や超伝導磁気シールドを適用し、環境からの生体保全や電子・量子機器の保護をめざして開発が進んでいる。さらに広帯域高感度大気環境モニタリングシステム、オゾン濃度の計測などの応用もある。

#### (4) 自然エネルギーとの連繋

地球温暖化対策として、 $CO_2$ を排出しない新エネルギーが注目されており、特に、太陽光発電や風力発電が徐々に普及しつつある。これらは発電量が天候に左右され安定した電気を得ることができない課題があるが、超伝導技術との組み合わせで大きな効果が期待できる。風力発電は、風速の変化に伴って瞬時瞬時に発電量が変わり、電力品質(電圧や周波数)に影響がでる。そこでSMESを用いて電圧を調整することで電力品質を一定に維持することが考えられる。太陽光発電についても、夜間の発電ができないので一日を通じて安定した電気を得ることができないが、超伝導フライホイールやSMESを用いて、昼間発電した電気を貯蔵し夜間に放出すれば、一日を通じて太陽光による電気が使えることになる。

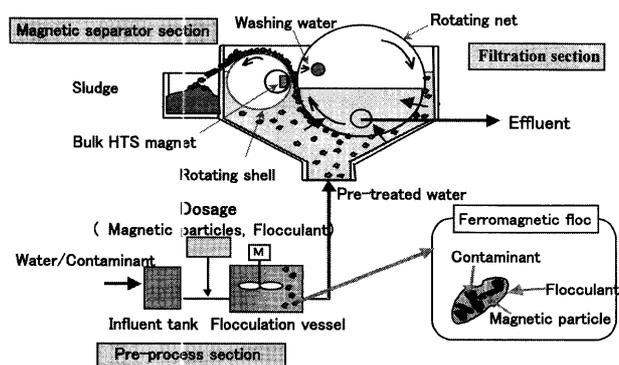


Fig. 11 Magnetic separation for water purification.

### 3.6 エネルギー・産業

#### 3.6.1 概要

我が国の電力需要は2030年頃がピークになり、また世界的にみれば人口は引き続き増加し、経済成長に伴って一人あたりの電力消費も増加すると考えられている。このような地球規模でのエネルギー増加と地球環境の調和を図りながら対応していくためには、電力機器の一層の省エネルギー化、高効率化が求められる。超伝導技術は、高密度大容量の電力を高効率で発生、輸送、貯蔵できる技術であり、21世紀には必須のものとして期待される。超伝導発電機、超伝導電力ケーブル、超伝導限流器、SMESやフライホイールなどがその応用例である。核融合については、既に本講座にて詳説されているとおりである。

産業・輸送分野では、シリコン単結晶引き上げ装置の熱対流を防止する磁場印加用超伝導磁石、高磁場下での材料プロセスに使用される超伝導磁石、超伝導磁気浮上式鉄道や電磁推進船の超伝導磁石がある。

#### 3.6.2 応用の現状と将来

SMESは電気事業の規制緩和にともなって、これまでのエネルギー貯蔵機能ばかりではなく、周波数の調整、電圧の安定化、瞬時停電対策など、電力系統調整装置として期待できるが、実用化にはコスト低減が不可欠である。将来的にSMES実用化に大きな影響を与えると予想される高温超伝導化も重要な課題である。

超伝導フライホイールでの超伝導軸受けは、低回転損失化が可能であり、幅広い応用が可能である。

界磁巻線を超伝導化した超伝導発電機は、7万kWモデル機の開発により技術的な実証が終了している。

超伝導送電ケーブル、超伝導限流器、電力用超伝導マグネット等の超伝導化は、直流機器だけでなく交流機器も超伝導化することにより、大きな導入効果が期待できる。高温超伝導材でも、三相のケーブルコアを一つの断熱管内に収納した三心一括型超伝導ケーブル（電圧66kV、電流1kA級、ケーブル長500m）[15]や、世界最大容量クラスの超伝導変圧器（22kV/6.9kV-2MVA単相プロトタイプ器）[16]、実用化をめざした世界初の液体窒素冷却全超伝導モーター[16]などが開発されている。

### 3.7 ナノテクノロジー・材料、計測

#### 3.7.1 概要

超伝導とナノテクノロジーは深い関係にある。超伝導状態を理論的に解明したBCS理論では、多数の電子が対になって互いに束縛状態にある（クーパ対）ことで説明しているが、この対の距離がnmオーダーであり、一方、超伝導線材の性能向上のために量子化磁束の動きを拘束するピン止めの距離やジョセフソン接合で2つの超伝導体の間にはさむトンネルバリア層も1nm~10nmである。すなわち、超伝導線材、バルク体による強磁場応用や、超伝導薄膜による超伝導エレクトロニクス応用を実現するためには、nmオーダーの技術が不可欠ということになる。

ナノテクノロジーは、マクロサイズと異なる物性の発現、寸法精度の精密化、製品サイズの微細化にあって、21世紀の新しい技術概念であり、また情報、バイオ、環境産業などへの展開が進んでいる。材料、計測などを含めた基盤技術の開発と密接に関係している。

#### 3.7.2 応用の現状と将来

##### (1) 極低温磁気顕微鏡

高温超伝導SQUIDを用いた高い空間分解能を有する磁気顕微鏡システムが商品化されている。例として、空間分解能50 $\mu$ m、最高感度20pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、有効走査範囲15cm $\times$ 15cmといった仕様の商品がある[17]。半導体、非鉄金属や回路パターン等の非接触欠陥検査などに適用されている。

##### (2) 地質調査技術

地質調査では、遠隔探査法である物理探査への期待が高く、磁場の時間変化を計測する誘導コイルによるものが一般的であるが、SQUIDによる探査は磁場の変位そのものを計測するため、より高精度で探査が可能になる。具体的には、地表に張った磁場送信ループに電流を流し、地表に設置したSQUIDで電流遮断後に地下で誘起される誘導電流による誘導磁場を計測するもので感度100fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下、スルーレート7.3mT/秒が得られている[18]。

##### (3) 電磁波検出

ジョセフソン素子が微弱な電磁波（特にミリ波、サブミリ波と呼ばれる数10~数100GHz）に敏感に応答する特性を活かして、さまざまな電磁波検出に適用されている。例えば、環境分野への計測応用として、オゾン分子の発する電磁波（110GHz）を測定し、オゾン濃度を評価すること[19]や、天文科学分野では、星雲をミリ波、サブミリ波で捉えることで星の誕生の初期段階を観測できる[20]。

##### 4 電圧標準装置

ジョセフソン素子に電磁波を照射すると、その周波数に比例した電圧がジョセフソン素子両端に発生する。周波数は10桁以上の高精度で決めることができるので、物理定数と同じ精度で正確な電圧を作り出すことができる。またジョセフソン素子を多数個直列接続すると、電圧が加算されて大きな電圧を得ることができ、10Vを1億分の1の精度で校正することができる電圧標準装置もある[21]。

##### 5 超高感度分析装置

臨界温度での超伝導転移に起因する急激な抵抗変化を利用して、微小な温度変化を高速・高感度に検出する装置と

して超伝導マイクロカロリメータがある。この装置は、熱の吸収体、超伝導薄膜、SQUID 電流計からなり、動作温度は 0.1 K 程度である。

天文科学分野では、ブラックホールや中性子星などの高エネルギー現象に伴って発生する X 線を超高感度で検出しているが、このセンサは熱検知タイプの微小デバイスで、X 線マイクロカロリメータと呼ばれている。この中の温度センサには超伝導遷移領域における急峻な電気抵抗の変化を利用した非常に感度の高い TES (Transition Edge Sensor) を用いており、このマイクロシステムにより X 線の高感度検出を可能としている [22]。

### 3.8 共通基盤・周辺技術

超伝導機器の発展には、冷却技術（小型冷凍機、伝導冷却技術）や材料（線材、バルク、薄膜）の発展が必須である。

#### (1) 小型冷凍機

超伝導を伸張させてきた重要技術として極低温技術・冷凍機がある。高温超伝導の出現にあっても超伝導機器の普及のためには、特に小型冷凍機の発展が不可欠である。約 50 年の歴史を有する冷凍機技術の発展は、大型ヘリウム冷凍機の導入に端を発し、一方、小型冷凍機は GM 冷凍機から始まり、磁気冷凍、パルス管冷凍機などの開発が進められてきた。1980 年代後半に、4 K レベルの GM 小型冷凍機が実現したこと、冷却温度のさらなる低下、性能向上が進められ、超伝導の実用化に大きく貢献してきている。1990 年代前半には、パルス管冷凍機で 4 K レベルが達成され、低振動を要求される超伝導機器への適用が進んでいる。

超伝導コイルでは MRI、超伝導デバイス関係では超伝導フィルタなど、実用化されている超伝導機器には小型冷凍機が適用されており、今後、超伝導コイルの伝導冷却、超伝導デバイスの発展や普及のために、小型冷凍機の重要性はますます高まっていくと思われる。

#### (2) 伝導冷却超伝導コイル

小型化や操作性向上他の観点から伝導冷却技術は重要で、特に、産業用の超伝導コイルや超伝導デバイス関係で不可欠になっている。超伝導コイルの高磁場化・大口径化においては、15 T、 $\Phi 170$  mm の Nb<sub>3</sub>Sn 無冷媒超伝導コイルが開発されている [23]。先進材料としての Nb<sub>3</sub>Al 線材や高温超伝導でも Fig. 12 に示すような 10 T レベルの伝導冷却コイルが開発されている [24, 25]。また世界最大級の高温超伝導伝導冷却コイルとしては、20 K、1.8 T、1.1 MJ の性能のコイルも開発されている [26]。

#### (3) 材料

超伝導材料（線材、バルク、薄膜）の特性向上や低コスト化は、超伝導機器の発展に不可欠であり、極限技術や最先端性能が必要となる核融合では、とりわけ必須である。

一例として、2001 年に日本で発見され、金属系超伝導材料として高い臨界温度 ( $T_c = 39$  K) を有する MgB<sub>2</sub> については、従来金属系材料に比べて熱的に安定という特徴とともに、製造工程で加熱処理が不要で原材料が豊富で材料調達が容易といった利点があり、NbTi 代替という点で期待がある。すでにコイル化技術も進んであり、開発されたコ

イルの例を Fig. 13 および Table 2 に示す [27]。

今後、新高温超伝導体の探索研究、高性能酸化物超伝導線材の開発、低交流損失線材の特性向上、次世代高温超伝導薄膜の合成、計算科学を利用した革新的超伝導量子デバイスの開発などが期待される。さらに、核融合のように、大型かつ強磁場の極限・最先端性能を要求する分野のために、金属系超伝導材料線材化技術のさらなる開発により強磁場 (25 T オーダ) 発生が可能で、機械的に安定な金属系超伝導材料の化技術および周辺技術の開発が期待される。

### 3.9 将来の展望

以上、超伝導技術の各分野における現状と将来技術について概説してきたが、これ以外にも多くの適用開発がなされており、超伝導技術がいかに広範な応用として期待されているかがわかる。この発展は、材料開発や冷凍機技術の着実な開発にも支えられてきており、今後も高温超伝導材料開発の進展や冷却技術の高度化に伴って、特に超伝導デバイスのブレイクスルーが起こることも予想される。

核融合分野において、今後、材料開発による性能向上、冷凍機冷却技術、コイル技術の高度化が必要であることは勿論、新たに情報処理や磁気シールド、放射線検出などを適用することや、基礎研究における計測、解析技術などで、将来的な技術が、核融合開発にとって、重要になってくる可能性や期待がある。Fig. 14 に他の科学技術分野と核融合研究との関係を模式的に記載した。基本性能を実現する上で、既に適用・必須となっている磁場閉じ込めコイルのさらなる技術の高度化は勿論のこととして、基礎研究における材料評価・解析技術、また核融合装置と他の電力機器と

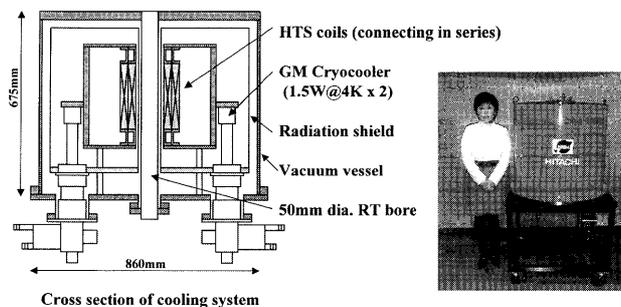


Fig. 12 Helium-free superconducting magnet.

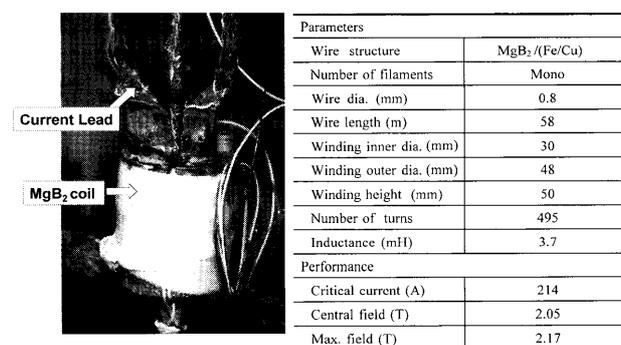


Fig. 13 Photograph of the MgB<sub>2</sub>/(Fe/Cu) solenoidal coil.

Table 2 Parameters and Performance of MgB<sub>2</sub>/(Fe/Cu) Coil.

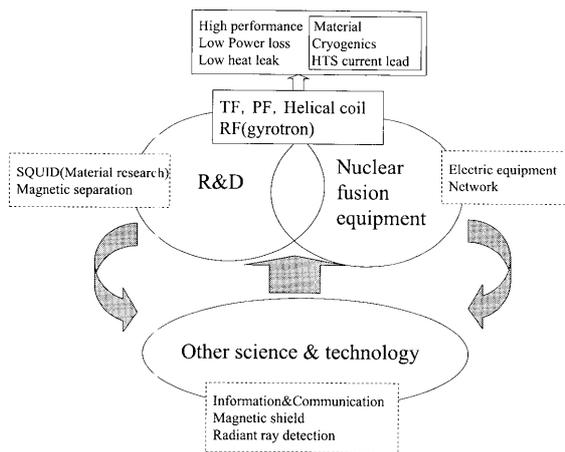


Fig. 14 Relation between Nuclear Fusion and Other Science & technology.

組み合わせて電力補償をする効率的なシステムや、さらには情報処理や磁気シールド、放射線検出などに、将来的な超伝導デバイス技術を適用することもあるかと思われる。

### 3.10 まとめ

今後の核融合開発においては、これまで以上に、大型で高性能の超伝導システムが必要となる。そのために、材料の開発や冷却技術の高度化が必須であるが、本稿で述べたようなあらゆる分野で開発が進められている超伝導技術により、将来、超伝導線材や極低温構造材、冷却システムなどに新たなブレイクスルー技術が生まれ、核融合開発に供することもあり得る。また先端性能を要求する核融合の材料開発などの基礎研究や品質管理技術においては、材料欠陥検出・評価技術の向上などが必要になると考えられ、SQUIDによる計測・解析技術の応用などが期待できる。さらには、高度化する核融合実験では、超伝導デバイスによる情報処理の可能性や、磁気シールドや放射線検出といった周辺技術を活用できる可能性も将来的にはありえる。強磁場発生という観点のみでなく、超伝導デバイス技術にも注目しその活用を検討する価値が今後あると考えらる。

超伝導技術は、21世紀のエネルギー、環境、ライフサイエンス、情報・通信の社会を革新する基盤的技術になると言われてきた。超伝導は、極限的性能を省エネルギーで達成するという画期的な技術であるが、究極のエネルギーをめざし、環境保全の上でも意義深い核融合とともに、新たな可能性と相互の発展を遂げ、21世紀の社会を支えていくことを期待してやまない。

### 参考文献

- [1] <http://www.nedo.go.jp> (NEDO 高度情報通信機器・デバイス基盤プログラム基本計画記載内容から作成)。
- [2] 荒井英一：低温工学 38, No.9 (2003)。
- [3] 神鳥明彦：IEEJ Trans. FM 125, pp.81-84 (2005)。
- [4] Superconductivity Communications Vol.8, No.4 (1999)。
- [5] 独立行政法人物質・材料研究機構ニュースリリース (2004年6月25日)。
- [6] 吉川正敏他：2004年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.74。
- [7] 西島茂宏他：2005年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.218。
- [8] 武田真一他：2005年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.221。
- [9] S. Yorozu *et al.*, IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, p.20 (2004)。
- [10] STI社(商品名 SuperLinkRx850); <http://www.suptech.com>
- [11] 株式会社日立製作所ニュースリリース (2004年1月21日)。
- [12] ISTEK 超電導技術動向報告会 (2005)。
- [13] 林 秀美他：2003年度春季低温工学・超電導学会講演。
- [14] NIMS NOW August, 2003。
- [15] 市川路春他：平成17年度電気学会全国大会論文集 Vol.5, 5-S15-4 (2005)。
- [16] Superconductivity Communications 14, No.1 (2005)。
- [17] 仁木工芸：ModelSMM-770。
- [18] 経済産業省・資源エネルギー庁：平成15年度鉱物資源探査技術開発等調査報告書 高精度物理探査技術の開発 (2004)。
- [19] [http://edevice.fujitsu.com/fvd/eco/siso\\_100.html](http://edevice.fujitsu.com/fvd/eco/siso_100.html)
- [20] [http://www.nro.nao.ac.jp/Misc/radio\\_obs.html](http://www.nro.nao.ac.jp/Misc/radio_obs.html)
- [21] [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/museum/keisoku/jyosefu/jyosefu.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/museum/keisoku/jyosefu/jyosefu.html)
- [22] R. Fujimoto *et al.*, AIP Conference Proceedings 605, 231 (2002)。
- [23] 広瀬量一他：2005年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.236。
- [24] 和田山芳英他：1999年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 p.179。
- [25] H. Morita *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, pp.1572-1575, June (2003)。
- [26] K. Tasaki *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 11, pp.2260-2263, Mar. (2001)。
- [27] K. Tanaka *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 14, pp.1039-1041, June (2004)。



あさ の かつ ひこ  
浅野 克彦

1978年東京工業大学理学部応用物理学科卒業。1980年同大学院理工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年(株)日立製作所入社。核融合、加速器、超伝導装置、放射線応用医療システムの設計・開発に従事。現在、同社電力グループ日立事業所 MDA 推進本部本部長。日本物理学会、低温工学協会、電気学会、プラズマ・核融合学会、日本加速器学会会員。