



## 2. 産業分野と核融合分野との技術シナジー効果

花井 哲  
(株式会社 東芝 京浜事業所)

### Synergy Effects of Superconducting Technology Progress in Industrial Applications and Nuclear Fusion Development

HANAI Satoshi

*Toshiba Corporation, Keihin Product Operations, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230-0045, Japan*

(Received 17 March 2005)

Superconducting technology has made progress with nuclear fusion development for about 30 years as an indispensable element of nuclear fusion technology. Some technologies that come from nuclear fusion development are applied to industrial applications. For example cable-in-conduit technology is applied to SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) project. On the other hand, superconducting magnets for MRI system and silicon single crystal growth become practical industries and another technologies that come from these industrial applications are applied to nuclear fusion development. In this report, superconducting products and superconducting technologies are presented at the point of synergy effects of nuclear fusion development and industrial applications.

#### Keywords:

superconducting technology, nuclear fusion development, synergy effects, superconducting magnet, industrial applications, SMES, cable-in-conduit conductor, MRI, silicon single crystal growth, HTS magnet

#### はじめに

将来のエネルギー源として期待され、開発が進められている核融合は、国際熱核融合実験炉 (ITER) や大型ヘリカル装置 (LHD) に代表されるような磁気閉じ込め方式を主体に開発が進められてきている。磁気閉じ込め方式では、プラズマを閉じ込めるための磁場が必須であり、発電用核融合炉におけるプラズマの閉じ込めには10T以上の高磁場を必要とする。したがって、効率よくプラズマを閉じ込めるためには、超伝導マグネットをはじめとする大型超伝導技術の確立と採用が不可欠である。

1970年代より臨界プラズマ実験装置 (JT-60) などの国家プロジェクトを契機に産業界でも核融合開発を行う部門が立ち上がり、この中で核融合開発と共に一般の超伝導応用技術の開発も進められるようになった。このようにして開発された超伝導技術の中には、医療分野に应用されたMRI用超伝導マグネットや、シリコン単結晶引き上げ用超伝導マグネットのように、ひとつの製品として認知されるようになったものも生まれた。また、一般産業分野への応用の中で開発された超伝導技術が核融合の分野にフィードバックされたりするようになってきた。もともと核融合と超伝導は学術的には独立したものであるが、このように核融合の開発が一般産業界における超伝導の開発を加速し、相互に発展してきた。

ここでは、一般産業分野と核融合分野との技術シナジー  
*author's e-mail: satoshi.hanai@toshiba.co.jp*

効果の観点でいくつかの超伝導製品とその超伝導技術の紹介を行う。

#### 2.1 超伝導エネルギー貯蔵 (SMES) 用超伝導マグネット

SMESは、超伝導マグネットで磁気的にエネルギーを貯蔵する装置で、エネルギーの出し入れ速度が速い、有効・無効電力を独立に制御できるなどの特長を持つことから、今後さらに進んでゆく電力自由化の中で、瞬低対策、系統安定化対策、周波数調整対策、負荷変動補償対策など、電力の安定供給や電力品質の確保に有力な超伝導機器として注目され、開発が進められている。瞬低対策用等の小型のSMES以外では、必要とされる出力は100 MW級で、エネルギー貯蔵量も数10 MJから数GJとなるため、SMES用超伝導マグネットも核融合装置用の超伝導マグネットと同様に大型のものとなる。また、高い出力を出すためには、大きな(電流×電圧)積が求められるため、必然的にコイル電流値もコイル耐電圧値も高いものが要求される。これらの要求は、核融合装置用の大型超伝導マグネットに求められたものと同じものであり、SMES用超伝導マグネット導体は、核融合分野で開発されてきたケーブル・イン・コンジット導体の技術を応用して開発が進められている。

ケーブル・イン・コンジット導体は、その名のとおりに、多重撚りされた超伝導線のケーブルをステンレス鋼などの

高強度材からなる管（コンジット）の中に収容することによって構成された超伝導体であり、大電流、高強度の特長を併せ持っている。また、超臨界圧ヘリウムをコンジット内部に流すことによって強制的に冷却されることから、液体ヘリウムの中に直接コイルを浸漬して冷却を行う浸漬冷却型の超伝導マグネットと異なり、導体そのものに絶縁を施すことができるため、高い絶縁性能をもったコイルを製作することができる。代表的なケーブル・イン・コンジット導体の模式図を Fig.1 に示す。ケーブル・イン・コンジット導体では、超伝導線の材質、素線径、本数、撚線方法をはじめとする超伝導ケーブルのパラメータとコンジットの材質、形状、断面積等をそれぞれ独立に設計することができることから、様々な要求仕様に対し、いろいろな大型高磁界コイル用導体が提案されてきた[1, 2]。

大型のコイルをコンパクトに設計・製作するには、超伝導素線の電流密度をできるだけ高くすることが求められる。一方、コイルは極低温で使用されるため、発熱源となる超伝導線の交流損失を低く抑えることが求められる。これらの要求を満たすためには、超伝導線のフィラメントを極細線まで加工することが不可欠である。このようにして製作された超伝導線は、通常外径 1 mm 以下で、1 本の超伝導線に実用的に流せる電流は 100 A 程度以下であるため、ケーブル・イン・コンジット導体では、多くの超伝導線素線を撚り合わせて大電流導体としている。文献[1]にも紹介されているが、ケーブル・イン・コンジット導体の開発当初は、クエンチが発生し、定格電流の半分以下しか電流を流せないという問題に遭遇したことがある。これは、撚線された多数の素線間に不均一な電流が流れる現象（偏流現象）によるものであることがわかり、各素線電流が再配分し、電流が均一化するよう、素線表面を完全な絶縁でなく、適切な抵抗体で覆うことによって、偏流現象を防止するとともに素線間を跨いで流れる結合電流による交流損失を低減する手法が開発された。

代表的な核融合用超伝導体として ITERCS モデルコイル用導体を Fig. 2 に、またその導体諸元を Table 1 に示す。本導体は、超伝導体として Nb<sub>3</sub>Sn を採用しており、コイル巻線後、超伝導生成の熱処理を行う設計が採用され、コンジット材には、熱処理と強度の観点からインコロイ 908 合金が採用されている。また、導体断面の中央には超臨界圧ヘリウムを流すためのサブチャンネルが設けられている。また、素線表面には偏流対策として、クロムめっきが施されている。

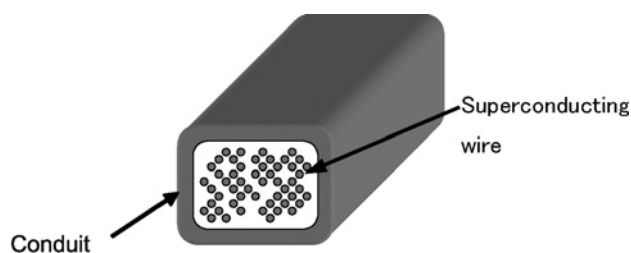


Fig. 1 Cable-in-conduit conductor.

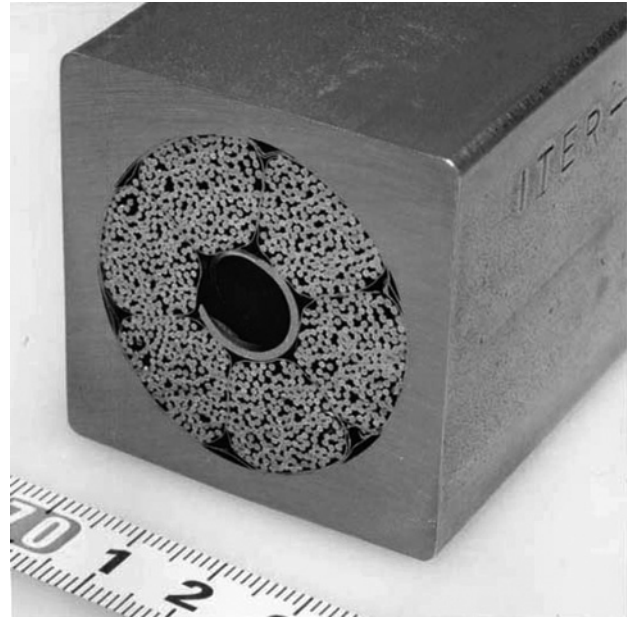


Fig. 2 Photograph of CS model coil conductor. (Photo credit by Japan Atomic Energy Research Institute).

Table 1 Parameter of ITER CS model coil conductor.

Rated current	40kA @13T
Superconductor	Nb <sub>3</sub> Sn
Number of strand	3 × 6 = 1152
Strand insulation	Cr plating
Strand diameter	0.81 mm
Cu/Non-Cu Ratio	1.5
Conduit material	Incoloy 908
Inner diameter of conduit	φ38 mm
Dimensions of conduit	51 mm × 51 mm

NEDO プロ SMES 開発第 1 フェーズ[3]に採用された導体も、このようにして開発された核融合用超伝導マグネットの導体技術を応用したものである。ここで採用されたケーブル・イン・コンジット導体を Fig.3 に、またその導体諸元を Table 2 に示す。20 MW - 360 MJ - 20 kA の定格をもつ本 SMES の導体は、表面に偏流対策と交流損失対策を考慮した酸化皮膜が施された超伝導素線 3 × 4 = 972 本をステンレス鋼のコンジットに収納したものであった。素線の表面処理に前述のクロムめっきを採用していないのは、本導体の設計が CS モデルコイル試験以前に行われたことやクロムめっきで使用される 6 価クロムの有毒性に配慮したことによるものである。通電試験で本導体は、偏流現象もなく、良好な安定性を示したが、導体の矩形断面化による変形に伴う撚り乱れや、酸化皮膜の絶縁抵抗のばらつきなどから、高次撚り素線間に長時定数をもった結合電流が発生し、不規則な交流損失の増大が見られた[4]。

国プロ SMES 開発第 2 フェーズではこの結果を踏まえ、交流損失の低減とともにコスト低減に主体をおいたケーブル・イン・コンジット導体の開発が行われ、Fig. 4, Table 3 に示すような導体が開発・採用された[5]。100 MW - 1800 MJ - 10 kA の定格を持つ本 SMES の導体は、超伝導線の本数や撚り次数を大幅に減らすなどして低コスト

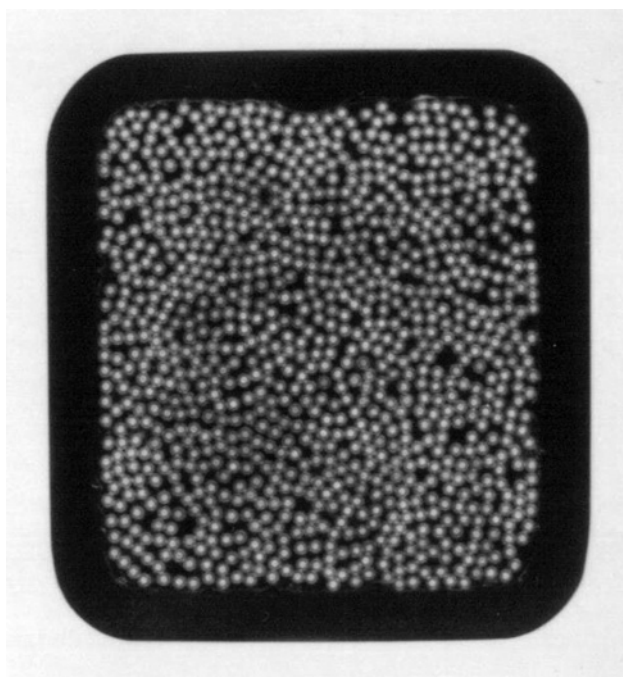


Fig. 3 Cross-section of SMES model coil conductor in National SMES project I.

Table 2 Parameter of SMES model coil conductor in National SMES project I

Rated current	20 kA @5.64T,4.5K
Superconductor	NbTi
Number of strand	$3^2 \times 4 = 972$ 本
Critical current	60 kA @ 5.64 T, 4.5 K
Strand insulation	Cu oxide
Strand diameter	0.62 mm
Cu/CuNi/NbTi Ratio	4.81/0.58/1
Filament diameter	6 $\mu$ m
Twist pitch	6.2 mm
Cable diameter	27.0 mm
Conduit material	SUS316L
Thickness of conduit	2.3 mm
Dimensions of conduit	25.4 mm $\times$ 27.8 mm

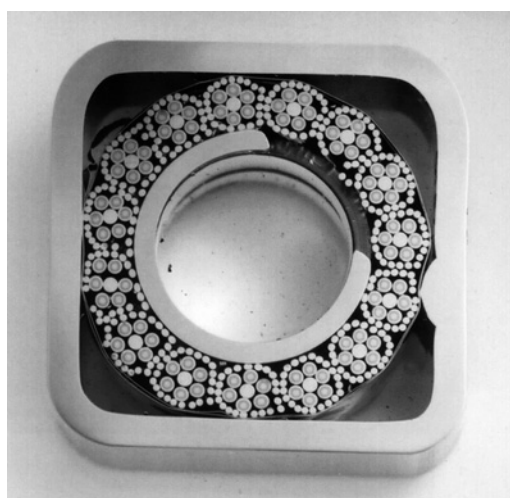


Fig. 4 Cross-section of SMES model coil conductor in National SMES project II.

Table 3 Parameter of SMES model coil conductor in national SMES project II

Rated current	10 kA @ 3T, 5K
Superconductor	NbTi
Number of strand	$[(1 \text{ cu} + 6 \text{ sc}) + 22 \text{ cu}] \times 15$
Critical current	21 kA @ 3 T, 5.0 K
Strand insulation	CuNi
Strand diameter	0.7 mm
(Cu+CuNi)/NbTi Ratio	3.0/1.0
Filament diameter	6 $\mu$ m
Twist pitch	9 mm
Cable diameter	16.85 mm
Conduit material	SUS316L
Thickness of conduit	2.74 mm
Dimensions of conduit	22.3 mm $\times$ 22.3 mm

化が図られている他，素線絶縁抵抗の安定化のためのCuNi被覆や撚線の撚り乱れの防止対策等が行われた．また，Fig. 5に示す要素モデルコイルの通電試験により，本導体は，安定で低交流損失特性をもつことが実証された．

SMES用超伝導マグネットは，低コストで効率よくエネルギーを貯蔵することが目的であるため，プラズマを閉じ込めるための高磁界を精度良く発生することが求められる核融合用超伝導マグネットと比較すると低磁界で低電流密度設計の導体が採用されている．このため，本導体をそのまま核融合用超伝導マグネット用の導体に採用することはできないが，低交流損失化の設計思想などは，核融合用超伝導マグネットにも応用できるものと考えられる．

一方，SMES導体をコンジットの中に入れてケーブル・イン・コンジット導体を製作する製造プロセスは，ステンレス鋼の帯板を連続的に折り曲げつつ，超伝導ケーブルを収納後，自動溶接し，矩形断面に成型する造管作業(Fig. 6参照)と呼ばれる製造技術を採用しているが，このプロセスにおける製造技術は，大型ヘリカル装置(LHD)のポロイダルコイル用導体製造時に培われた技術をベースにしたものである．

## 2.2 磁気共鳴画像診断装置用超伝導マグネット 他一般産業用超伝導マグネット

一般産業分野において現在までに製品化が行われた超伝導技術応用製品といえば，医療用の超伝導磁気共鳴画像診断装置(MRI)であり，それにつづくものとしてあげられるのが，シリコン単結晶引き上げ装置用超伝導マグネットである．MRIは，核磁気共鳴現象を利用して人体の断面画像診断を行う装置であり，これまでに永久磁石を利用したものや，常伝導マグネットを利用したものや，超伝導マグネットを利用したものがそれぞれ実用化されてきた．鮮明な断面画像を得るため，ここに用いられるマグネットは，診断装置内部において極めて均一度の高い0.5~1.5 Tの磁場を長時間安定に発生することが求められる．また病院内での設置という観点からは，心臓ペースメーカー使用者を考慮し，漏洩磁界が低いことその他，軽量であることが求められる．これらの要求に対して超伝導マグネットは，最も優



Fig. 5 Photograph of SMES model coil in National SMES project II.



Fig. 6 Conduit forming process of cable-in-conduit conductor.

れた特性を持っており、現在では超伝導マグネットを利用したMRIが主流になっている。Fig. 7に最新の1.5 TのMRIシステムの一例を示す。

MRI用超伝導マグネットの開発では、液体ヘリウム注液のメンテナンス頻度を下げるため、コイル励磁後に電気回路を切換え、電気抵抗のない超伝導回路に電流を流し続け



Fig. 7 Photograph of 1.5T MRI System (Toshiba "ECELART Vantage").

る永久電流モード方式が作用され、永久電流モードの実現に必要な永久電流モードスイッチの開発、抵抗のない超伝導接続の開発、クライオスタットへの熱侵入低減技術の開発などが行われた[6]。

一方、単結晶引き上げ装置用の超伝導マグネットは、半導体製造の原材料となるシリコン単結晶を製造する際、炉内の溶融シリコンに0.4~0.5 T程度の磁場を加え、シリコンの対流を抑制するMCZ法 (Magnetic Field Applied Czochralski Method) によって、高純度で欠陥の少ない大径のシリコン単結晶を引き上げるために用いられるものである。

これらの超伝導マグネットは、前項にて紹介した核融合用超伝導マグネットやSMES用超伝導マグネットと異なり、基本的には定常磁場を形成するためのものであるため、交流損失低減や、大電流、高電圧に関する厳しい要求はないが、一般産業用ということから、いかに低コストで

安定した定常磁場が発生できるかが求められている。そのため、これらの超伝導マグネットは、一般に標準線と呼ばれるフィラメント径数  $10\ \mu\text{m}$ 、線径  $\phi 1\ \text{mm}$  程度の NbTi 超伝導線を直接ソレノイド巻きし、レジン含浸したものを、液体ヘリウム中で浸漬冷却するタイプのものが多い。また、クエンチを起こさず、コイルを安定運転させるため、クラックによる発熱が小さく、しかも熱伝導性の良いレジンの開発などが行われてきた。また、MRI 用超伝導マグネットの永久電流モード技術（超伝導接続など）は、高磁界 NMR 用超伝導マグネットにも応用されている [6]。

これらのコイルの中にはヘリウムフリーマグネットあるいは直冷マグネットなどと呼ばれ、小型冷凍機により直接伝導冷却され、液体ヘリウムを用いないタイプのものもある。ヘリウムフリーマグネットでは、専門知識を必要とする液体ヘリウムを取り扱うことなく、冷凍機のスイッチを



Fig. 8 Photograph of conductive-cooled superconducting magnet.

入れるだけで、超伝導マグネットの冷却・通電ができることから、現在では、大学、研究所などで磁場を利用した研究に広く使われている。Fig. 8 にヘリウムフリーマグネットの写真の一例を示す。

超伝導 MRI だけでも全世界には 1 万台以上が製造され、現在、この種の超伝導マグネットの製造技術は、かなり成熟したものになっている。核融合分野においても、プラズマを電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECH) するために用いられるジャイロトロン用超伝導マグネットには、この種の超伝導マグネットの技術が応用されている。

### 2.3 高温超伝導マグネット (HTS シリコン単結晶, HTS リニア)

高温超伝導の核融合分野への応用は、日本原子力研究所で核融合炉用の 60 kA 電流リードの開発が行われたりしているものの [7]、コイルとしては、昨年、東大の内部導体型プラズマ実験装置 Mini-RT の浮上コイルに適用されたのが初めてであり [8]、まだ始まったばかりの段階である。一方、一般産業分野においては、未だ実用化には至らないものの、超伝導ケーブル [9]、限流器をはじめとする電力機器やシリコン単結晶引き上げ用超伝導マグネット [10] や磁気浮上式鉄道用の超伝導マグネット [11] 等への適用の開発が盛んに進められている。

ここでは、これらの中でも最も磁気エネルギーの大きなシリコン単結晶引き上げ用高温超伝導マグネットに関して紹介する。シリコン単結晶引き上げ用高温超伝導マグネットは、Bi2223 銀シーステープ線材を使って、現在の主流である 200 mm あるいは 300 mm の径をもつシリコン単結晶を引き上げるための超伝導マグネットとして開発されたものである。マグネットの写真を Fig. 9 に示す。マグネットは、それぞれ 18 個のパンケーキコイルからなるコイル 2 個

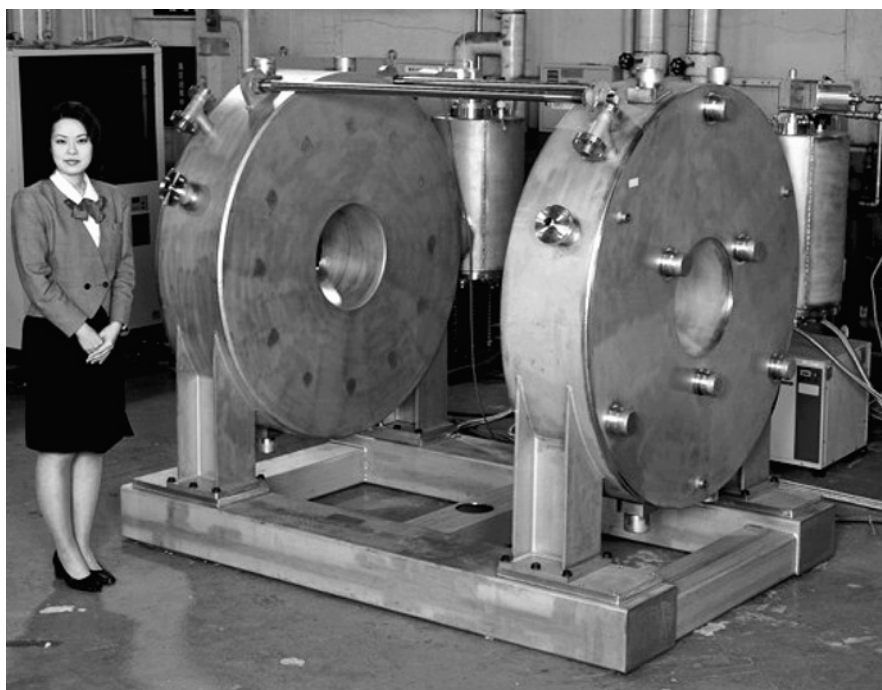


Fig. 9 Photograph of High-temperature superconducting R&D magnet for silicon single crystal growth applications.

をスプリット型に配置したもので、磁気エネルギー 1.1 MJ、コイル間の中央部には、0.4 T の磁場を発生することができる。それぞれのコイルは小型冷凍機を用いて、20 K 以下に冷却されているが、4 K まで冷却される低温超伝導のシリコン単結晶引き上げ用超伝導マグネットと比較すると、冷凍機の運転効率を高くできることから、現在、使用されている低温超伝導マグネットの 1/3 の運転コストで運用することができる。

1 枚のパンケーキコイルは 3 枚の Bi2223 銀シーステープ線材とポリイミド絶縁が施された 1 枚のステンレステープを内径 600 mm、外径 1,200 mm にパラ巻きすることで構成されている。Bi2223 銀シーステープ線材は、歪に弱く超伝導特性の劣化が発生しやすいことから、いかに劣化を発生させずにコイル巻線や導体接続を行うかが、本マグネット開発の最重要課題であった。線材の曲げ径、張力などコイル製造過程における様々な線材劣化要因の管理を行うことによって、最終的には、総計 80 km の線材を劣化なく巻線し、Bi2223 銀シーステープ線材の巻線技術を確立することができたことが、通電試験等から確認された。現在、この巻線技術を活用し、東大の磁気装置 RT-1 の製作が行われている。

## 2.4 まとめ

一般産業分野において実用化され、量産化されるようになった MRI 用超伝導マグネットやシリコン単結晶引き上げ用超伝導マグネットや今まさに実用化に向けて開発が行われている SMES などの電力機器も、その中のひとつひとつ

の超伝導技術は核融合開発の中で生まれたものも多い。また、一般産業分野で開発された超伝導技術も、最近では核融合開発の中に取り入れられるようになってきている。このように超伝導技術は、核融合分野と一般産業分野においてのそれぞれのシナジー効果によって発展してきたところが大きい。

核融合の実現や、一般産業分野における超伝導産業の発展のためにも、超伝導技術のさらなる進歩が求められているが、今後さらに産業分野と核融合分野との技術シナジー効果が発揮され、21 世紀の産業社会に貢献していくことが期待される。

## 参考文献

- [1] 島本 進：低温工学 37, 180 (2002).
- [2] 吉田 清：低温工学 37, 190 (2002).
- [3] ISTEC：超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査総合報告書（平成11年3月）.
- [4] T. Hamajima *et al.*, Cryogenics 39, 351 (1999).
- [5] 超電導電力貯蔵システム技術開発推進委員会他：平成15年度超電導電力貯蔵システム技術開発の成果（平成16年3月）.
- [6] 高野廣久他：低温工学 37, 40 (2002).
- [7] 磯野高明他：低温工学 39, 122 (2004).
- [8] 三戸利行他：低温工学 39, 182 (2004).
- [9] 本庄昇一他：低温工学 36, 242 (2001).
- [10] M. Ono *et al.*, IEEE Trans. Appl. Superconduct., Vol.12 No.1 984 (2002).
- [11] 五十嵐基仁他：低温工学 39, 651 (2004).



はな い さとし  
花 井 哲

1980年東京大学工学部原子力工学科卒業。1982年同大学院工学系研究科原子力工学専攻修士課程修了。同年東京芝浦電気(株)(現株東芝)入社、京浜事業所に勤務。核融合実験機器・各種マグネット等の開発・設計業務に従事。現在、同事業所機器装置部開発機器技術主査。主に超伝導応用機器の開発・設計業務に従事。低温工学協会、電気学会、日本 AEM 学会会員。