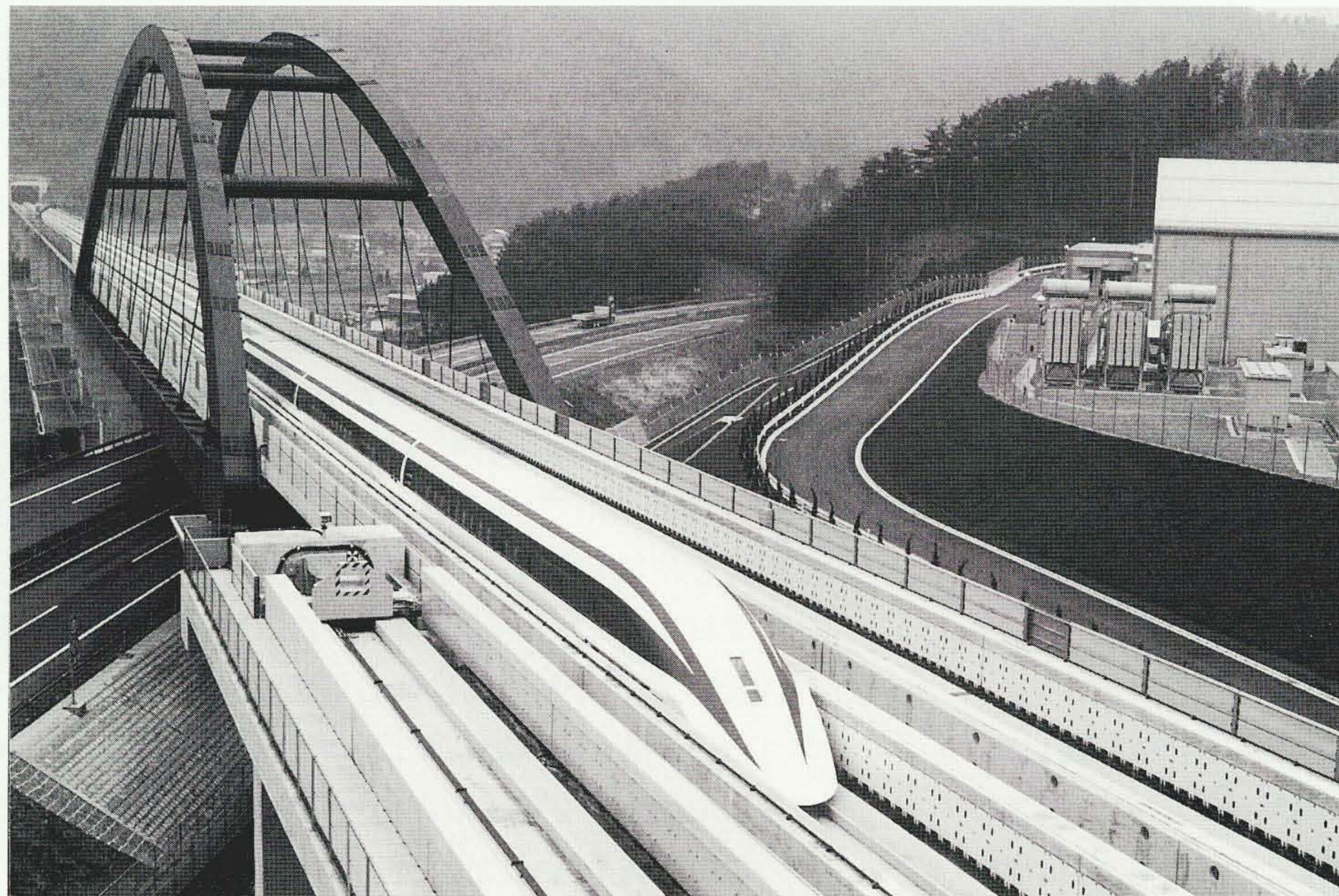


世界をリードする日立製作所の超電導技術

Hitachi's Leading Superconducting Technologies

大井 征雄	Masao Ôi	鈴木 史男	Fumio Suzuki
鈴木 昌平	Shôhei Suzuki	東山 和寿	Kazutoshi Higashiyama
塩原 亮一	Ryôichi Shiobara		



(写真提供：財団法人鉄道総合技術研究所)

山梨リニア実験線の走行試験状況

超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線では、1997年12月に最高速度550 km/hを達成した。

日立製作所が超電導に本格的に取り組むはじめてから30年以上が経過した。この間の技術進歩は規模の点でも質の点でも著しく、その応用範囲も拡大の一途をたどっている。日立製作所は、その中で、素材から応用まで幅広い技術力を結集して、多くの超電導応用プロジェクトに取り組んできた。

最近では、電力分野の超電導発電機、交通分野の超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線(リニア モーターカー)、核融合分野のLHD(大型ヘリカル装置)などの超大型プロジェクトが続々と試験または運転を開始している。日立製作所は、これらのプロジェクトでも主要機器・部品を担当するなど、超電導技術・極低温技術を駆使して大きく貢献している。

また、材料の分野でも、酸化物超電導体など先端的な素材の開発と応用研究を推進し、特に高磁界マグネットの分野で超電導磁場発生の世界記録を塗り替えている。

超電導技術は今後さらに応用範囲を広げて発展していくものと予想され、日立製作所は、技術開発の推進と総合システム力によって社会の要請にこたえていく。

1 はじめに

日立製作所は、1950年代後半から超電導の技術開発に着手した。初期には主としてMHD(電磁流体力学)応用の直接発電機器用として開発を始めたが、その後、磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発や、核融合、加速器用マグネット^{1), 2)}などの超電導化が進み、さらに近年は、医療用のMRI(磁気共鳴断層撮像装置)や電力用の発電機・変圧器・エネルギー貯蔵機器(SMES)、産業・環境

機器に組み込まれるものなど、応用範囲の広がりに応じて多くの製品を開発してきた^{3), 4)}。

極低温での使用という条件があるために、超電導磁石には超電導状態を維持するための安定化という課題が付きまわっているが、極細多心線の使用やマグネットの巻線技術の向上、多種類の安定化材料と複合技術の開発などの多面的な努力の結果、現在では、液体ヘリウム温度レベル(4 K)の超電導応用技術はかなり確立されているものと言える。

以上の状況を踏まえて、わが国では20世紀の最後を飾る超電導プロジェクトが推進されている。(1) 電力分野では、70 MWという世界最大の超電導発電機の試作開発、(2) 交通分野では、定常走行500 km/hを目指す「山梨リニア実験線」、(3) 核融合分野では、世界最大の超電導コイルシステムで核融合プラズマを閉じ込めるLHD(大型ヘリカル装置)である。いずれも10年規模の計画・建設段階を経て、1997～1998年に相次いで試験・運転に入り、所期の成果を上げつつある。

日立製作所は、これらのプロジェクトのすべてで重要機器や要(かなめ)となるコアシステムを担当し、高い評価を得るとともに、計画全体の遂行に大きく貢献している。

ここでは、超電導大型プロジェクトを中心に、日立製作所の超電導分野での開発内容と成果について述べる。

2 最近の超電導技術の動向

日立製作所の超電導マグネットの製作実績を図1に示す。同図中、磁気エネルギーが最大のものは、1998年に完成した文部省核融合科学研究所の世界最大の超電導核融合実験装置“LHD⁵⁾”であり、磁場が最大のものは、1996年に発生磁場の世界最高記録を塗り替えた、科学技術庁金属材料技術研究所のマルチコア計画用超電導マグネットである。世界的にも最大・最高級のこれらの技術により、わが国が世界の超電導技術をリードしていることがわかる。

超電導マグネットが運転される極低温下では、金属な

どの比熱は室温に比べて数千分の1に下がるので、わずかなじょう乱が発熱・温度上昇につながり、超電導状態を維持できる限界温度(臨界温度)を超えて超電導状態が破壊する(常電導転移)。これを防ぐために、種々の安定化法や新材料が開発されている。

超電導発電機の界磁巻線やLHDの超電導導体では、部分的に常電導転移した場合に、電流を分流して発熱を抑える安定化材として純アルミニウムを用いた。

超電導発電機、LHD、および磁気浮上式鉄道用超電導磁石では、耐ひずみ特性が化合物系に比べて格段に優れている合金系超電導体(Nb-Ti)を採用し、ねじれを伴うヘリカルコイル(LHD)や回転子溝への巻線(Super-GM)などの三次元成形を行った。一方、核融合などの大型超電導コイルでは、(Nb-Ti)₃SnやNb₃Alなどの化合物系線材を使用した強制冷却方式が今後の主流になると見られており、この技術を基に、ITER(国際熱核融合実験炉)の研究開発が精力的に進められている。

さらに、酸化物系の線材は、液体窒素(77 K)レベルでの使用や従来値を超える高磁界発生の可能性を秘めており、この開発も活発に行われている。

3 超電導応用システム

3.1 超電導発電機

通商産業省工業技術院の「ニューサンシャイン計画」の一環として、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)とSuper-GM(超電導発電関連機器・材料技術研究組合)の下で、昭和63年(1988年)度から開発を進めてき

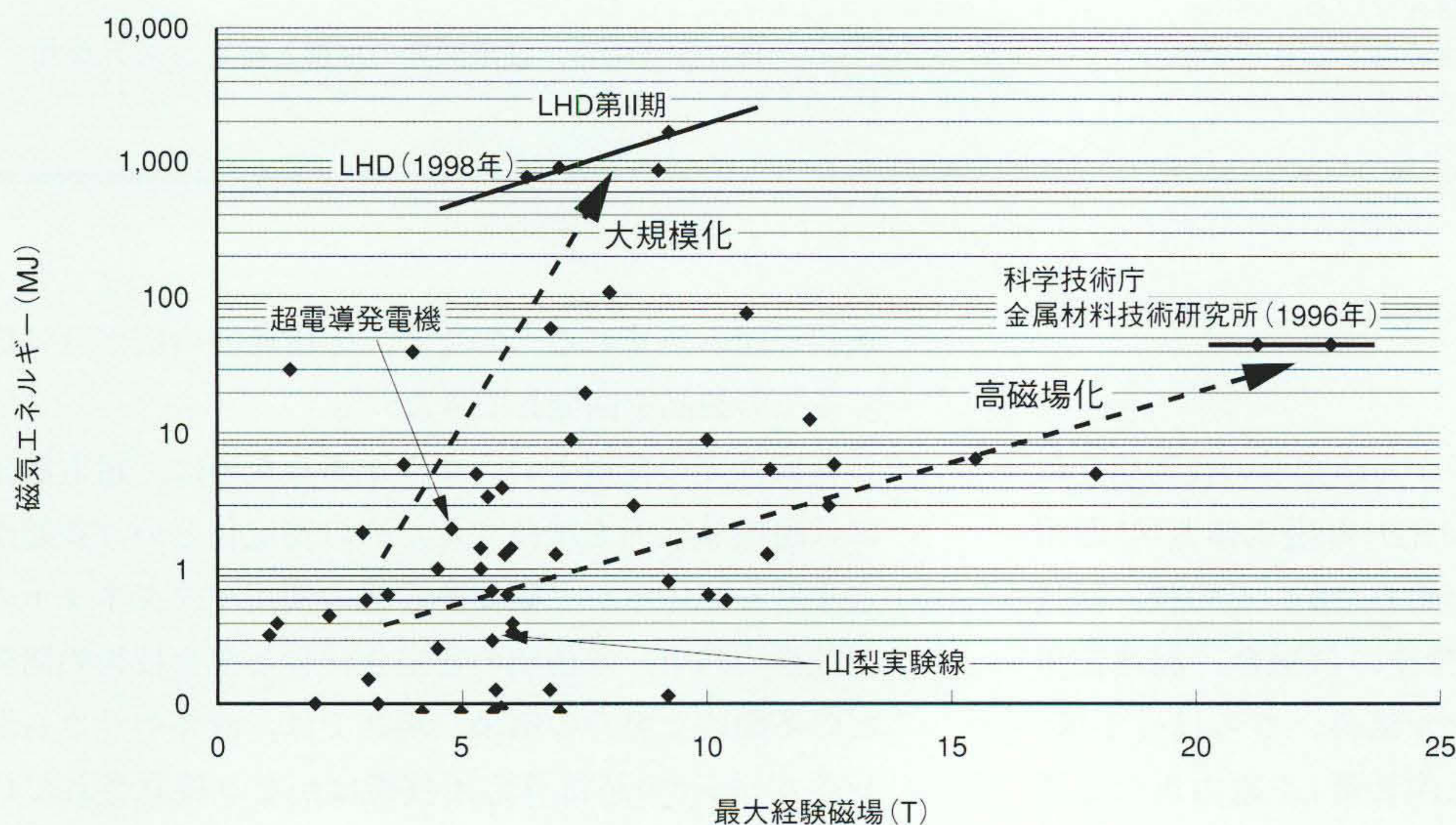


図1 日立製作所の超電導マグネット製作実績

30年以上の歴史を持つ日立製作所の超電導マグネット製作実績を見ると、大規模化、高磁場化の方向がわかる。

た超電導発電機の現地実証試験を、1997年に開始した。重電3社のトップを切って行った現地実証試験では、基本試験、負荷試験、および過酷試験を終え、200 MW級パイロット機へつながる諸データを取得することができた。

超電導発電機のメリットとして、以下の三つがあげられる。

- (1) 系統安定度向上(送電電力容量が1.2から1.5倍向上)
- (2) 効率向上(0.5~1.0%効率向上)
- (3) コンパクト化(70~50%に重量低減)

ロータは多重の円筒で構成しており、円筒間を真空とした断熱構造としている。ロータ内部の界磁巻線にはNbTi超電導コイルを使用し、液体ヘリウムで4 Kまで冷却し、コイルを超電導状態にしている。また、液体ヘリウムを3,600 r/minで回転する高速回転体に供給するので、磁性流体を用いたHTC(ヘリウム給排装置)で約90 L/hの液体ヘリウムを供給するとともに、内部で蒸発したガスヘリウムをロータ外部に排出する構造としている。

一方、日立製作所が開発し、製作にあたったステータに関しては、ロータの超電導コイルから発生する強力な磁場を有効に利用するため、発生損失を低減した水冷却二重転位電機子導体を開発した。また、強力な磁場中で電機子コイルを支持するために、FRP(繊維強化プラスチック)製のティースを採用している。

上記の超電導発電機を用いて、関西電力株式会社大阪発電所構内のSuper-GM試験センターで、1997年11月に世界最大の78.7 MWの出力を達成することができた(図2参照)。海外では米国やドイツなどで開発が行われたが、今までの最大出力は20 MWであり、今回の記録はこれを

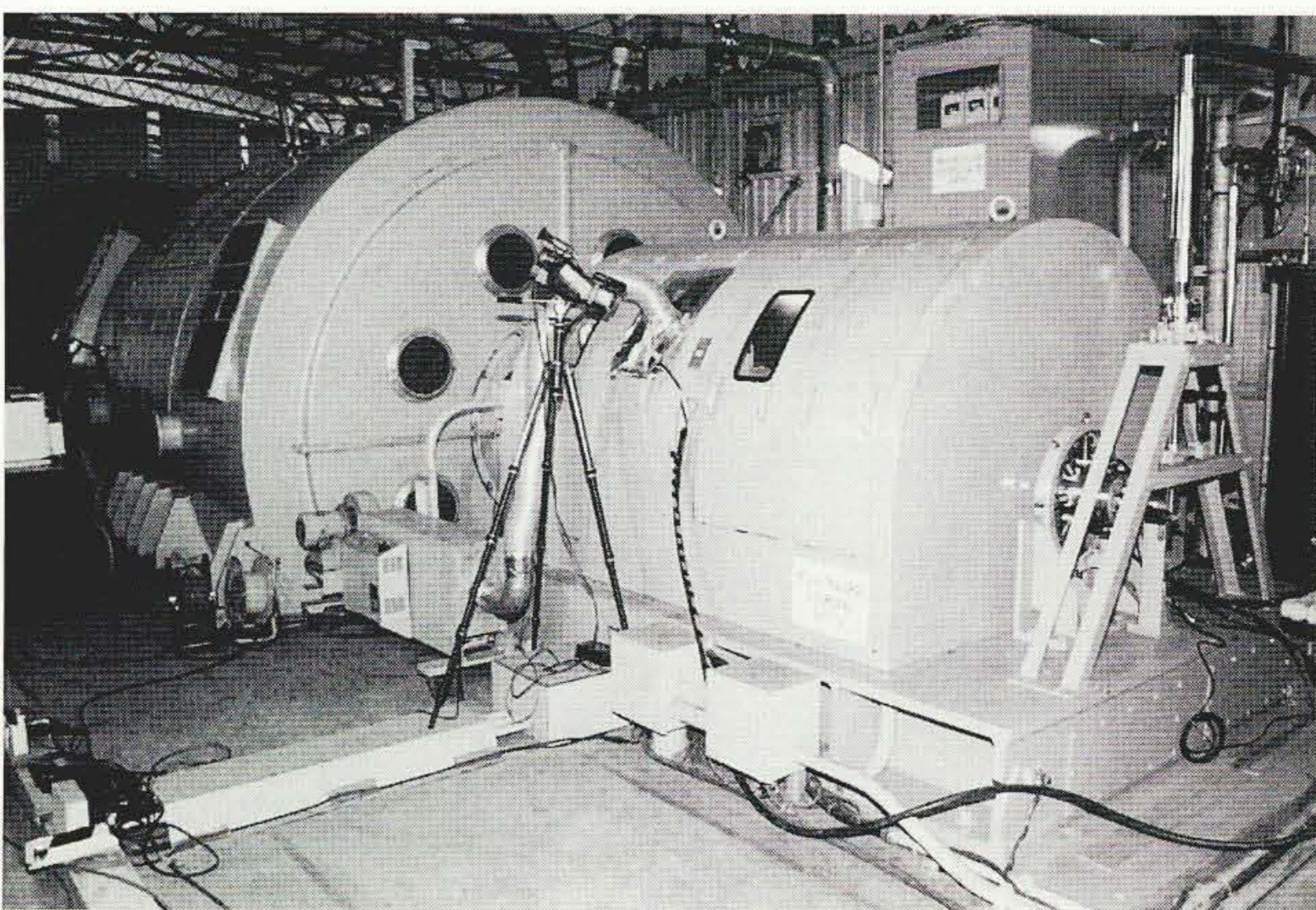


図2 超電導発電機の試験状況

1997年11月に、Super-GM試験センターで世界最大出力78.7 MWを達成した。

大幅に上回るものである。

一方、ステータに関しては、モデル機ロータと組み合わせて、1998年8月に1,500時間の長期試験を実施し、超電導発電機の信頼性を確認することができた。

今後、これらの成果を基に、次のステップである200 MW級超電導発電機の実用化研究開発を推進していく予定である。

3.2 核融合・加速器

3.2.1 核融合

磁気閉込め型の核融合装置は、プラズマ閉込め磁場を発生する各種コイルを持っている。炉としての規模とエネルギー収支から想定すると、これらのコイルは超電導がふさわしく、今後の大型実験装置(実験炉)は基本的に超電導システムとなるものと考えられる。

文部省核融合科学研究所で建設されたLHDは、ドーナツ状の真空容器の外側に、らせん状に巻きつけたヘリカルコイルでプラズマを閉じ込める核融合装置である^{5)~7)}。このヘリカルコイルは、大半径3.9 m、小半径0.975 m、中心磁場3 T、蓄積エネルギー0.92 GJ(第Ⅱ期では中心磁場4 T、蓄積エネルギー1.64 GJ)という、超電導コイルとしても世界最大級のものである。

コイルとプラズマ間の空間を確保するにあたって、この種の大型コイルとしては非常に高い電流密度(40 A/mm²、第Ⅱ期では53 A/mm²)が要求された。このため、冷却安定性の確保と高精度巻線が必要とされ、高純度アルミニウム安定化材の使用や、13軸制御高精度巻線機の開発をはじめとする多くの新技術が投入された。1998年3月31日に初プラズマ点火を達成した後、順調に実験を進めている。

次期核融合プロジェクトとしては、日本、米国、ヨーロッパ連合、ロシアの4極協力によるITER プロジェクトが進められ、この中に超大型超電導コイルの開発が組み込まれている。わが国が中心になって進めているのが、装置中心部に設置される中央ソレノイドコイル(CSコイル)の研究開発である。(Nb-Ti)₃SnやNb₃Alを用いた種々の強制冷却コイルを組み合わせ、日本原子力研究所でこの冷却・励磁試験が行われる予定である。

3.2.2 加速器

加速器分野では、文部省高エネルギー加速器研究機構が建設中のKEK-Bプロジェクトで、ビーム衝突点に設置されるQCS(超電導四極電磁石)が完成した⁸⁾。

また、理化学研究所の「RI(Radio-Isotope)ビームファクトリー計画」で建設予定のSRC(超電導リングサイクロ

トロン)でも、今までの成果を反映したうえで新たな知見を取り入れて、主要部品を製作中である。

3.3 超電導磁気浮上式鉄道

3.3.1 山梨リニア実験線

超電導を応用した磁気浮上式高速鉄道は、1977年から宮崎実験線で、基礎的な走行実験が重ねられた。その成果は、新たに山梨県に建設された山梨リニア実験線に引き継がれ、現在、走行実験が行われている。

山梨リニア実験線は、東海旅客鉄道株式会社、財団法人鉄道総合技術研究所、および日本鉄道建設公団のプロジェクトチームによって1990年に建設が始められた。日立製作所は、超電導磁石の開発や、地上コイル、台車、車体、および変換機器などの製作に参画している。

1997年4月の走行開始以来、速度向上試験を重ね、同年12月に予定どおり、鉄道史上初の最高速度550 km/hを達成した。

このときの車両は3両編成で、編成長78 mである。この編成のうちの1台車に日立製作所製の超電導磁石2台が搭載され、その後さらに4台が納入されている。

3.3.2 超電導磁石

山梨リニア実験線用超電導磁石は、全長5.4 m、四極で起磁力700 kA×4コイル、浮上力108 kNの仕様である。

浮上式鉄道用の超電導磁石は、動的な力や変動磁界の下で運転されるという点で、他の用途の超電導磁石と大きく異なっている。山梨リニア実験線用超電導磁石の開発は、この変動磁界と振動への対処を主眼として進めら

れた。

地上コイルからの変動磁界によって真空容器に渦電流が流れ、その渦電流と超電導コイルの磁界との作用で電磁力が生じ、振動が発生する。

極低温領域では、振動は摩擦損を生じ、変動磁界は渦電流損を生じる。これらはいずれも、液体ヘリウムを蒸発させる熱となる。ヘリウム蒸発量を車載冷凍機的能力8 W以内に抑えることが、この超電導磁石開発のポイントであった。

そのために、新たに「渦電流解析」と「連成振動解析コード」を東海旅客鉄道株式会社と共同で開発し、解析によって最適な支持体系と全体構造を決定した⁹⁾。渦電流解析の例を図3に示す。

これらの開発は、東海旅客鉄道株式会社と財団法人鉄道総合技術研究所の指導の下に実施されている。なお山梨リニア実験線は、運輸省から国庫補助金を受けて推進しているものである。

4 超電導材料の開発

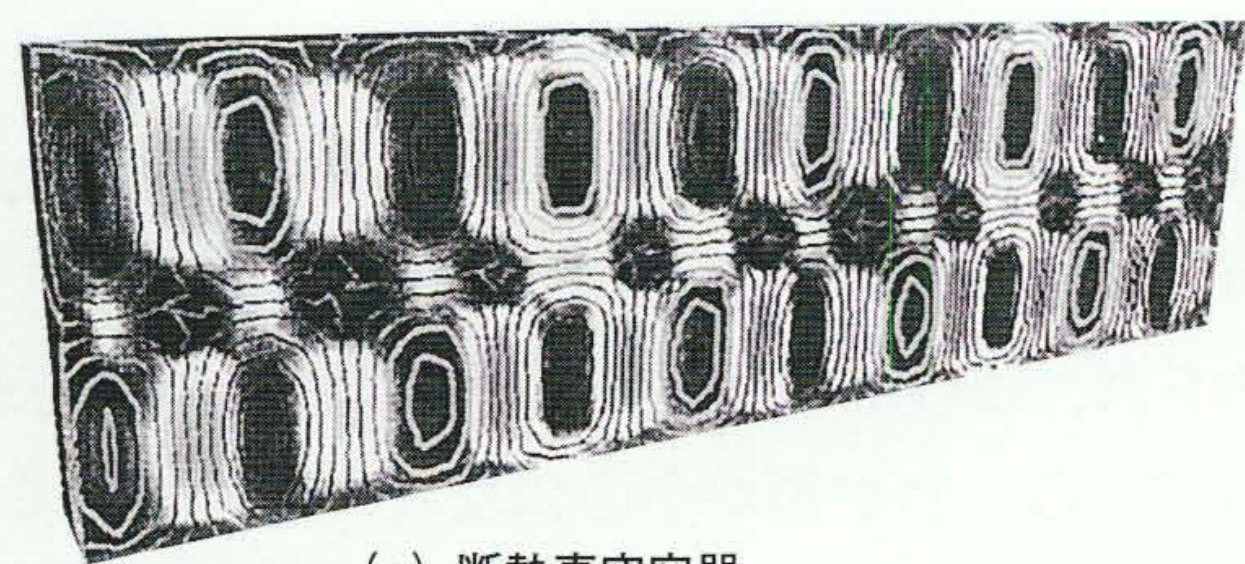
4.1 高温超電導材料

液体窒素温度(77 K)で使用できる高温超電導線材が完成すれば、高価で取り扱いの難しい液体ヘリウムによる冷却から開放され、高磁界をより平易に利用することが可能となる。

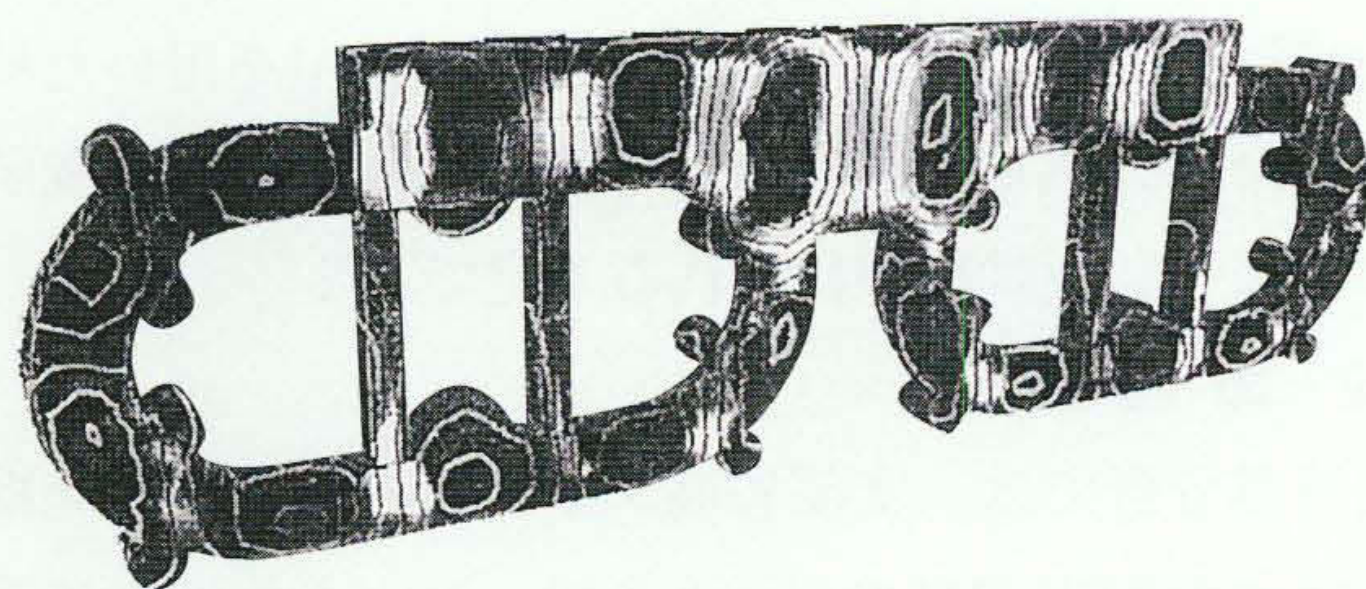
高温超電導体は平板状のセラミックスであるが、大きな超電導電流が流れるようにするには、すべての結晶粒子を一定方向にそろえなければならない。高温超電導線材では、長さ1 cm当たり数十万個の結晶粒子が存在する計算になる。このため、日立製作所は、膨大な数の結晶を数キロメートルにわたってタイルのように規則正しく配列させる、高度な技術と道具の開発を進めている。

4.1.1 CUTE銀テープ基板

上記の結晶配列用の道具の一つとして、超電導結晶を簡単に並べることができる「CUTE(Cube Texture)銀テープ」を京都大学と共同で開発した。CUTE銀テープは、外見は普通の銀テープであるが、テープ表面の銀原子が規則的に配列している(図4参照)。このテープ上に作製された高温超電導体は、銀原子の影響によって電流の流れやすい方向に整列する。銀のインゴットを圧延して加熱するだけで、いくらでも長いCUTE銀テープが作製できるので、これまでに単位長100 mの均一なテープを作製している。



(a) 断熱真空容器



(b) ふく射シールド

図3 浮上走行時の渦電流解析の例(走行速度500 km/h)

地上コイルからの変動磁界により、真空容器およびふく射シールドに渦電流が流れる様子を示す。

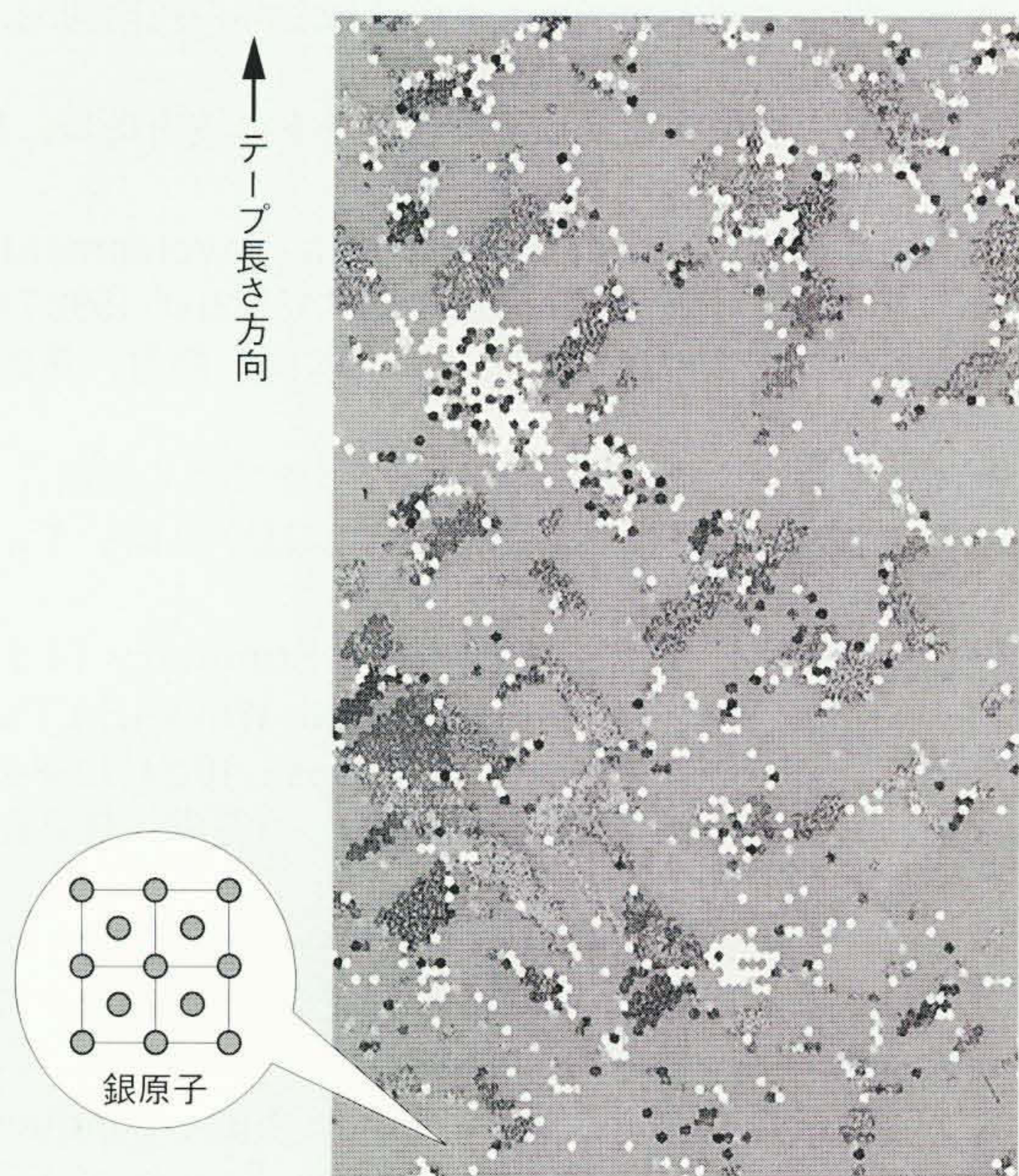


図4 CUTE銀テープ表面の原子配置マッピング

テープの約90%の銀結晶の領域が、超電導結晶をそろえる効果を持っている。

4.1.2 TI-1223線材

通商産業省工業技術院の「ニューサンシャイン計画」の「超電導電力応用技術開発」の一環として、NEDO、Super-GMの下で、CUTE銀テープを基板に用いたTI-1223高温超電導線材の開発を推進している。超電導体の形成に多くの研究機関が真空成膜法を採用している中で、日立製作所は、長尺線材の作製に適した高速常圧プロセスを採用している。これは、加熱した銀テープ上に霧化器で発生した原料ミストを吹き付けて膜を作り、タリウム酸化物の蒸気中で焼成するという簡単なものである。線材作製速度は1 m/hであり、プロセスが簡便なので、スケールアップが容易である。CUTE銀テープ上に形成されたタリウム系超電導体の結晶は、電流の流れやすい方向に整列していることが確認され、100 kA/cm² (77 K, 0 T) の高い臨界電流密度を示している。

4.2 高磁界用線材

Bi-2212はTI-1223と同じ高温超電導材料であるが、極低温では従来の金属系超電導材料よりも高い臨界磁界を持つという特徴がある。線材はキロメートル級のものがすでに作製され、液体ヘリウム温度から20 K程度で使用する高磁界用線材としての新たな地位を築きつつある。一方、金属系線材でもNb₃Alで高磁界特性の改善が図られつつあり、適用磁界領域を23.5 Tまで拡大できる可能

性がでてきた。以上の線材は将来、核融合炉や加速器、MRI装置など高磁界を応用した装置への適用が期待される。

4.2.1 Bi-2212線材

Bi-2212でも、線材を作製するときには電流が流れやすい方向に結晶をそろえる必要がある。作製法にはパウダー イン チューブ法を用いて、超電導層の緻(ち)密化と平滑な銀との界面を増やすことに注力した加工法を採用している。この結果、Bi-2212多心テープ状線材は、Jc 4,700 A/mm² (4.2 K, 0 T), 1,700 A/mm² (4.2 K, 30 T) という世界最高レベルの性能を持っている。総長1 kmのBi-2212線材を使用して作製した20段積層ダブルパンケーキコイル(外径158 mm, 内径64 mm, 高さ220 mm)の外観を図5に示す。現在、科学技術庁金属材料技術研究所で計画している1 GHz NMRの最内層コイルの試作機として納入したものである。1998年10月時点で18 Tのバックアップ磁場中で3 Tを発生させ、トータル21 Tの磁束密度達成に成功している。

テープ状の線材では厚みと幅を精度よくそろえることが容易ではないことから、今後、高品位マグネットを作製するためには、ソレノイド巻線ができる丸線や平角状線材の開発が強く望まれている。日立製作所は、科学技術庁金属材料技術研究所、日立電線株式会社と共同で、

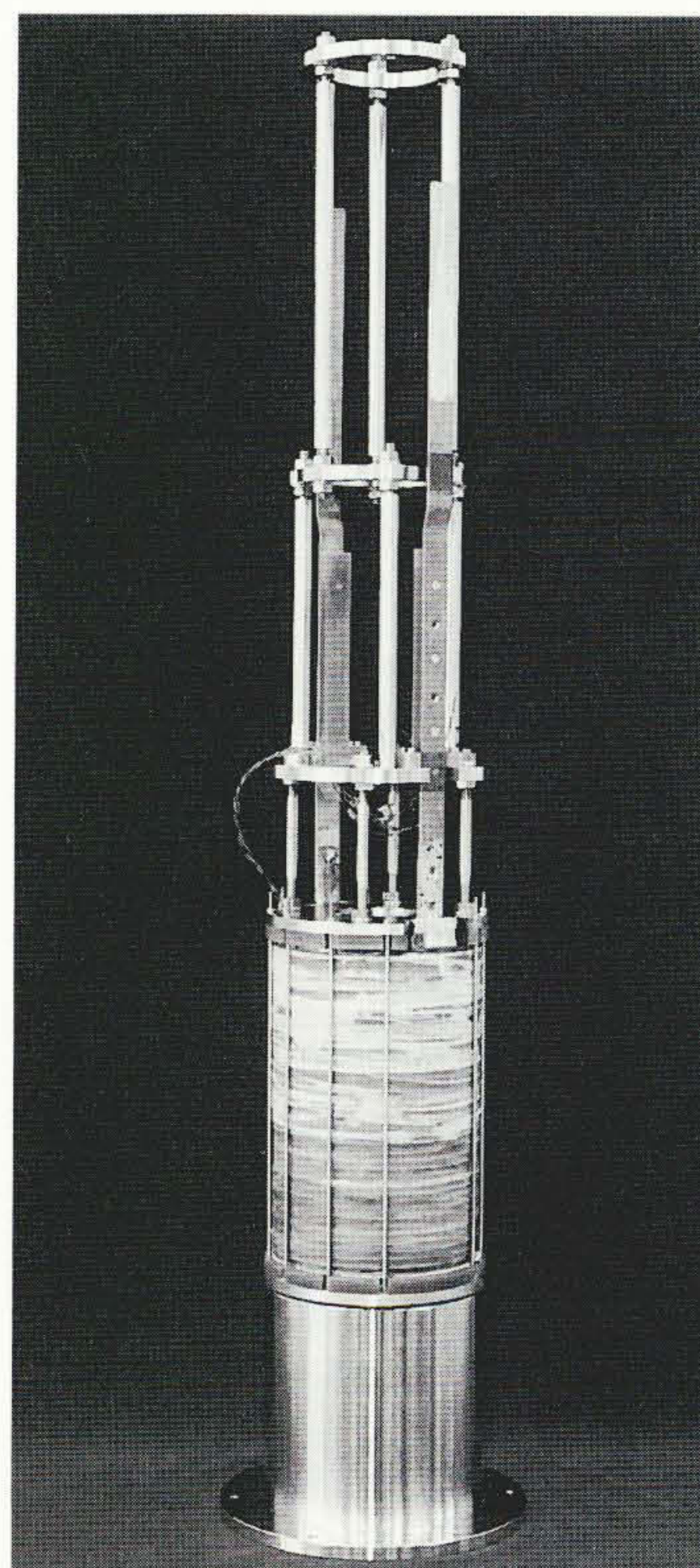


図5 科学技術庁金属材料技術研究所納めの20段積層ダブルパンケーキコイルの外観

外径158 mm, 内径64 mm, 高さ220 mmの大型コイルで、総長1 kmの線材を使用して作製した。18 Tバックアップ磁場中で3 Tを発生する。

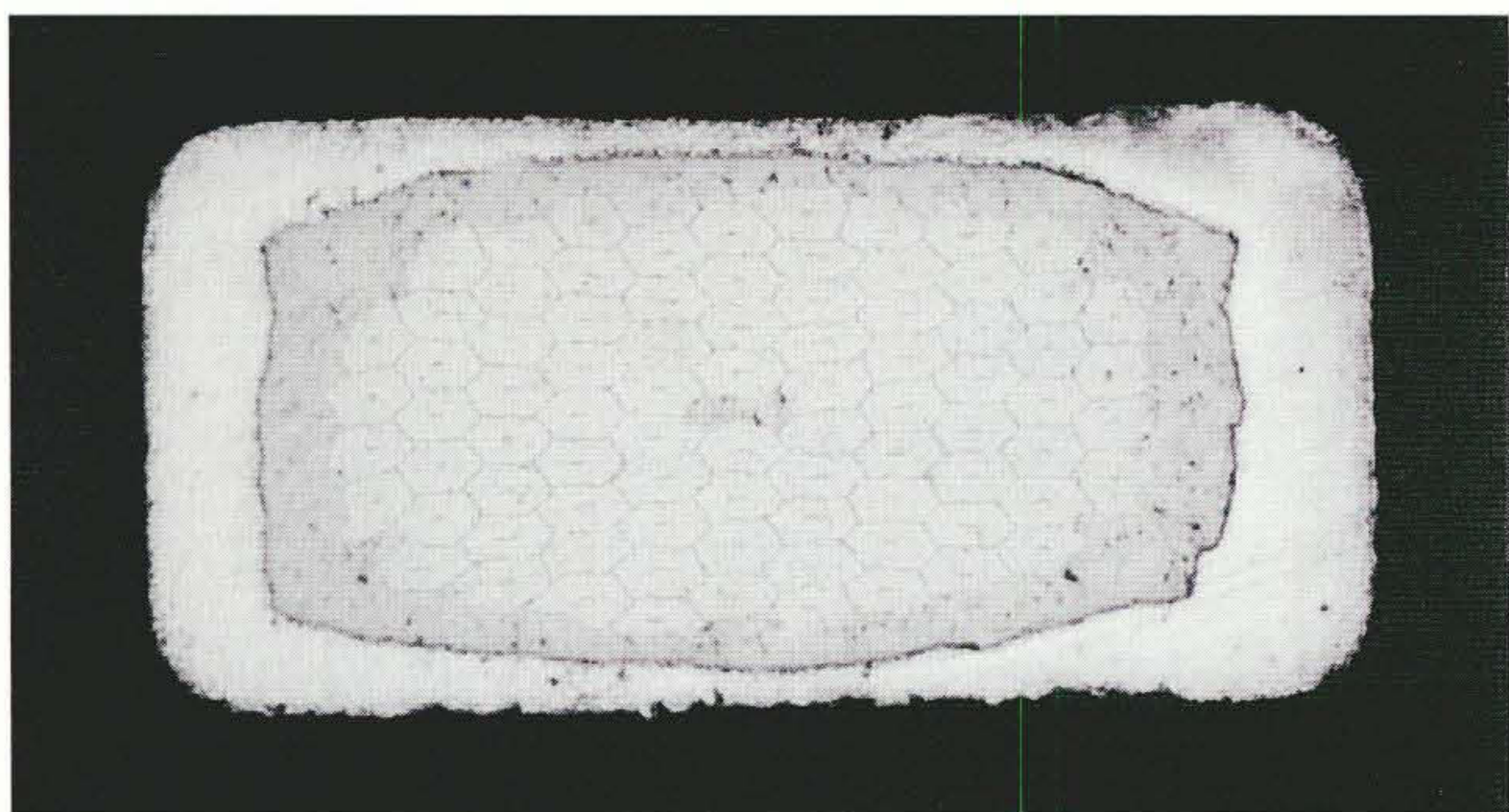


図6 急熱急冷Nb₃Al線材の断面

外周部の白色部が銅，その内側のやや黒い部分がニオブ，その中の六角形に見える部分がNb₃Alである。

実用的な形状と性能を持つ新しいBi-2212 ROSAT線材を開発した。このROSAT線材(Rotation-Symmetric Arranged Tape-in-Tube Wire)では，丸線内部にテープ状線材が回転対称性を持つように配置されている。丸線の中に多数のテープ線材を均一に埋め込むことにより，超電導結晶の配列を向上でき，従来のテープ状線材と比較しても遜(そん)色ない1,000 A級のI_cと2,500 A/mm² (4.2 K, 0 T)のJ_cを実現できた。

4.2.2 急熱急冷Nb₃Al線材

従来のNb₃Al線材は，熱処理の過程で組成が3:1からずれるため，高磁界特性が低下し，適用磁界は16 Tが限界であった。日立製作所は，科学技術庁金属材料技術研究所，日立電線株式会社と共同で，金属系では最高の23.5 Tの高磁界への適用が可能なNb₃Alの長尺線材を開発した。この線材はNb母材中にNb₃Alフィラメントが埋め込まれた構造で，外側には超電導安定化用のCuが被覆されている(図6参照)。真空中でNbとAlの複合素線を約2,000 °Cまで連続的に通電加熱しながら金属Ga浴中で急冷する方法を適用し，組成ずれを無くすることにより，J_cが200 A/mm² (1.8 K, 23.5 T)の高磁界特性を実現できた。

5 おわりに

ここでは，最近の大型プロジェクトを中心に，日立製作所の超電導技術について述べた。

超電導技術は，その応用範囲が広がるにしたがって，ますます身近なものとなりつつある。これまでにない連続高磁場を発生できるという利点のほかに，原理的にジュール損がないという特質は，エネルギーの節約など環境負荷を軽減する大きな効果を生み出すものと考えられる。

日立製作所は，今後も，超電導技術開発をさらに進め，社会の期待にこたえていく考えである。

参考文献

- 1) 木村，外：超電導マグネットの核融合への技術開発，日立評論，**62**，5，381～386(昭55-5)
- 2) 斎藤，外：核融合用超電導マグネットの技術進歩，日立評論，**66**，9，701～706(昭59-9)
- 3) Suzuki, et al.: Hitachi Research Development on Superconducting Technology, JAPAN, 21st(1992-7)
- 4) 伊藤，外：超電導応用技術の開発状況，動力，第220号(1994-1)
- 5) 社団法人プラズマ・核融合学会：プラズマ・核融合学会誌，特集：大型ヘリカル装置(LHD)計画，Vol.74 Supplement(1998)
- 6) O. Motojima, et al.: Progress Summary of LHD Engineering Design and Construction, 17th IAEA Fusion Energy Conference, Yokohama, Japan, 19-24(1998-10)
- 7) 浅野，外：大型ヘリカル装置(LHD)の完成，日立評論，**81**，2，177～182(平11-2)
- 8) 土屋，外：超電導技術－高エネルギー物理学研究所Bファクトリー納め四極超電導磁石および冷凍機システム－，日立評論，**79**，2，233～236(平9-2)
- 9) K. Tsuchiya, et al.: Final Focus Superconducting Magnet System for the Interaction Region of KEKB, EPAC 98, 20-38(1998)
- 10) 渡邊，外：山梨リニア実験線用超電導磁石および地上コイル，日立評論，**79**，2，185～190(平9-2)

執筆者紹介



大井 征雄

1965年日立製作所入社，日立工場 所属
現在，タービン発電機，核融合装置など大型電機製品の設計・開発に従事
電気学会会員，プラズマ・核融合学会会員
E-mail: ooi @ cm. hitachi. hitachi. co. jp



鈴木 昌平

1974年日立製作所入社，日立工場 核融合加速器開発センタ 所属
現在，核融合・加速器および関連超電導機器の開発・設計に従事
電気学会会員，日本物理学会会員，プラズマ・核融合学会会員，低温工学協会会員
E-mail: shohei.suzuki @ cm. hitachi. hitachi. co. jp



塩原 亮一

1980年日立製作所入社，日立工場 電力設計部 所属
現在，超電導発電機の研究開発，タービン発電機の設計に従事
電気学会会員
E-mail: shiobara @ cm. hitachi. hitachi. co. jp



鈴木 史男

1960年日立製作所入社，日立工場 核融合加速器開発センタ 所属
現在，磁気浮上式鉄道用超電導磁石の開発に従事
低温工学協会会員
E-mail: fsuzuki @ cm. hitachi. hitachi. co. jp



東山 和寿

1983年日立製作所入社，日立研究所 エネルギー素子研究部 所属
現在，酸化物超電導線材の研究開発に従事
日本化学会会員，応用物理学会会員，低温工学協会会員
E-mail: khigashi @ hrl. hitachi. co. jp