



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

Vol. **4**

## 超電導分野の 技術戦略策定に向けて

2015年10月

<b>1</b> 章 超電導技術の概要	2
<b>2</b> 章 高温超電導 (HTS) 技術の置かれた状況	4
2-1 技術開発の動向 (電力分野)	4
2-2 技術開発の動向 (産業・輸送等分野)	9
2-3 技術開発の動向 (線材)	9
2-4 産業競争力 (諸外国との比較)	12
<b>3</b> 章 高温超電導 (HTS) 分野の技術課題	17
3-1 HTS応用技術	17
3-2 HTS線材技術	17
<b>4</b> 章 おわりに	18

TSCとはTechnology Strategy Center (技術戦略研究センター)の略称です。

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

## 1章 超電導技術の概要

超電導物質<sup>\*1</sup>には、電気抵抗がほぼゼロであるという性質や、磁界を跳ね返すマイスナー効果（磁石を近づけると反発して離れようとする）、超電導物質内の不純物などの常電導状態の部分に磁束が捕捉されることによって磁場が固定されるピン止め効果（又はピンニング効果、超電導物質と磁石の位置が固定される現象をもたらす）、磁束の量子化（リング状の超電導体の中空部分に生じる磁束は連続した値を取らない）などの特徴がある。特に、電気抵抗がほぼゼロであるという性質を利用すれば、電流が流れる際の損失を圧倒的に抑えられるため、省エネルギー技術としての期待が大きい。このような特徴から、エネルギー基本計画（2014年4月閣議決定）や科学技術イノベーション総合戦略2015（2015年6月閣議決定）においても、超電導技術開発の進展が期待されている。

超電導現象は、超電導物質を臨界温度  $T_c$ <sup>\*2</sup>以下に冷却することによって発現する。 $T_c$ は物質によって異なり、その温度によって低温超電導（low-temperature superconductor / superconducting:以下「LTS」という。）と高温超電導（high-temperature superconductor / superconducting:以下「HTS」という。）<sup>\*3</sup>に区分されている。LTSを適用した機器については、超高感度の磁気測定装置であるSQUID（Superconducting Quantum Interference Device:超電導量子干渉計）、MRI（Magnetic Resonance Imaging:磁気共鳴画像撮影）装置、NMR（Nuclear Magnetic Resonance:核磁気共鳴）装置などが既に実用化されている。しかし、超電導状態を維持するために、多くは液体ヘリウム（沸点: 4K, -269℃）を用いて冷却する必要があり、その液体ヘリウムは昨今供給ひっ迫が懸念されつつある。

1986年に銅酸化物系のHTS物質が発見されて以来、これを適用したHTS線材の特性向上とHTS適用機器の開発が世界中で進められている。HTSは液体窒素の沸点（77K, -196℃）程度までの冷却で利用可能となり、液体ヘリウムでの冷却が必要なLTSに対して冷却に必要な電力が理論的には約2割削減できるため、省エネ性に優れている。また、LTS線材で得られる磁場強度の限界は22T（テスラ）程度であるが、主にY（イットリウム）系の銅酸化物系HTS線材では、25T以上の更に高い磁場強度が利用できることから、こうした優れた特性を活用したHTSの新たな適用先の発掘が期待される。

超電導分野のサプライチェーンは、「材料」→「線材」→「機器」→

「システム」と大別できる。NEDOでは、1988年からの「超電導材料・超電導素子研究開発」においてHTSを利用した超電導線材の開発に着手し、量産化のための基盤技術を確立した。HTS線材については、現在、日系企業の住友電気工業、古河電気工業（SuperPower）、フジクラ及び米国のAMSC（American Superconductor Corporation）の4社が、ある程度の規模で供給可能である。ただし、近年は韓国のSuNAMの追い上げが著しい。また、NEDOではHTSを適用した機器についても研究開発を行っており、近年ではHTS線材を用いた電力ケーブルの実系統実証試験に成功している。加えて、モータ、フライホイール、変圧器、SMES（Superconducting Magnetic Energy Storage）<sup>\*4</sup>、限流器<sup>\*5</sup>などについても試作機を完成させ、HTS機器用冷凍機の開発にも成功した。このような約30年にわたるHTSの研究開発により、近年ようやくBi系、Y系をはじめとするHTS線材の基盤技術が確立<sup>\*6</sup>し、また、HTS線材の冷却に最適な冷凍機も開発され、その性能は飛躍的に向上<sup>\*7</sup>している。

近年、HTS線材については、銅酸化物系（Bi（ビスマス）系、Y系）線材の更なる実用化開発が進められているほか、 $MgB_2$ （二ホウ化マグネシウム）やFe（鉄）系など近年新たに発見された材料についても、将来の市場形成に資するための革新的な基盤研究が進められている。また、HTS適用機器については、電力ケーブル、限流器、マグネットを活用したモータやフライホイール、磁気分離装置<sup>\*8</sup>、MDDS（Magnetic Drug Delivery System:磁気誘導型薬剤輸送システム）、SQUID装置など、超電導の特徴を生かせる幅広い分野での技術開発が進められている。特に電力ケーブルは国内外で多くの実証研究が進められており、海外では、1kmの交流ケーブル（ドイツ、韓国）などの実証プロジェクトが実施されている。また、米国も送配電への適用に高い関心をもっている。

現在、超電導を適用した機器の世界市場規模は年間約7,000億円といわれている。その大半はLTSによるMRIと研究開発用途（高磁場の発生を要する設備や部品）で占められており、その他の超電導適用機器の市場は形成されていないのが現状である。一方、電線・ケーブルの市場は年間約20兆円の規模があり、うち電力インフラ用途がその約5割を占めている。そのため、HTS電力ケーブルの実用化が進めば大きな市場を創出することが期待されており、2030年には年間約1兆円規模の世界市場が形成されるの見通しもある。

また、産業・輸送分野等では既存技術による省エネルギーは極限まで進められているが、長期エネルギー需給見通し（2015年7月、経済産業省資源エネルギー庁）では、2030年に省エネ量1,961億kWh（電

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

力需要の17%)の実現が必要とされており、新しい省エネルギー技術が求められている。HTS技術を適用すると、このうち約10億kWh以上のエネルギー削減への貢献が見込めることから、HTS適用機器の早期の社会実装が期待される。

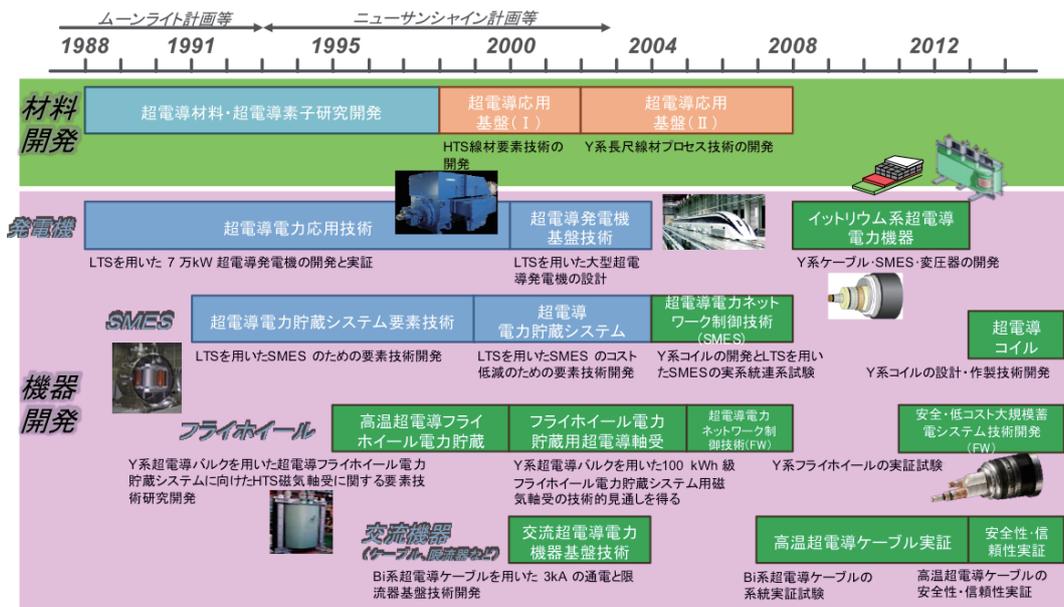


図1 超電導分野におけるこれまでの我が国の主な技術開発

出所：NEDO作成(2015)

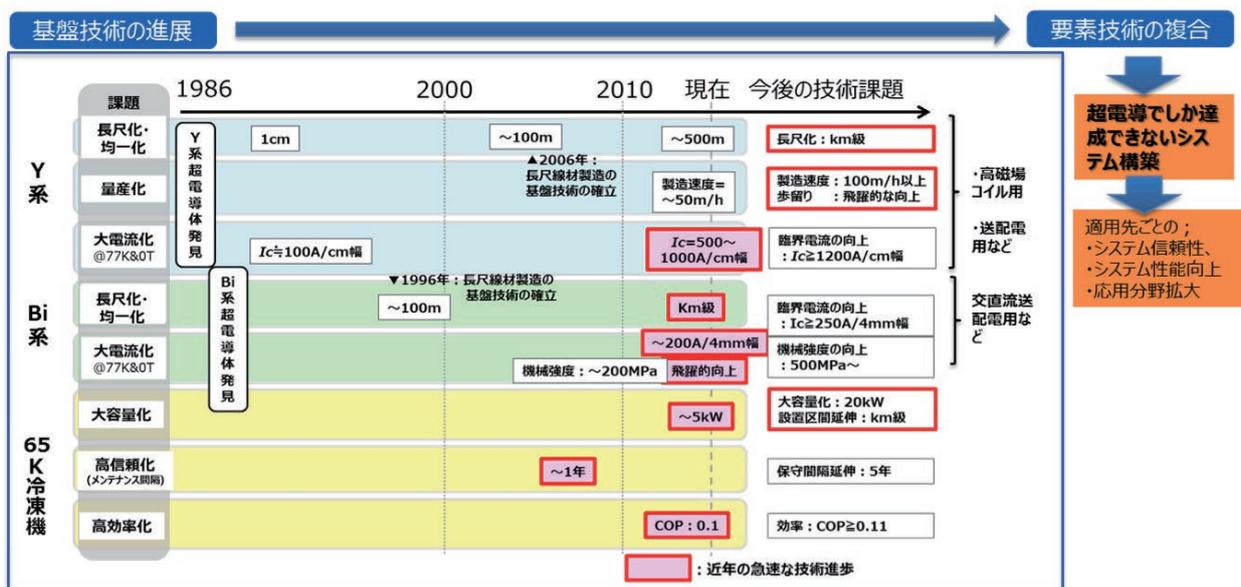


図2 高温超電導 (HTS) 基盤技術の進歩 (抜粋)

出所：NEDO技術戦略研究センター作成(2015)

## 超電導分野の技術戦略策定に向けて

これまで蓄積してきた我が国の HTS 技術は、線材や冷凍機、適用機器の技術開発で得た成果をシステムに昇華する段階にあるといえる。そのためには、HTS 技術の特徴が最も活かされる分野を、HTS 技術を開発する側だけでなく、適用する側の要求を明確にした上で、システムとして最適化するための技術開発を行うことが求められる。加えて、技術開発の成果を適度なタイミングで実証するとともに、これらの基盤となる HTS 線材、とりわけ Y 系線材について、長尺化やコスト低減を意識した生産効率（品質や歩留り、生産速度）の向上等を図るための技術開発に取り組むことが必要である。これらの取組により、HTS 技術の早期の社会実装の実現や適用分野の拡大が期待される。

- ※1 超電導現象を発現する物質を超電導物質や超電導体と呼ぶ。
- ※2 常電導状態から超電導状態に変わる温度のこと。
- ※3 一般に、臨界温度が概ね 25K (-248℃) 以上の超電導を高温超電導と呼ぶ。
- ※4 超電導を用いた電力貯蔵装置。
- ※5 一定の電流値を超える過電流が流れると超電導状態が消失し、急激に抵抗が生じる超電導物質の特徴を応用した、落雷等による事故電流を抑制する装置。
- ※6 Y 系線材においては、大電流化等の性能向上、線材製造基盤技術等。Bi 系線材においては、キロメートル級長尺化、大電流化、強磁場での利用を可能にする機械的強度の向上等。
- ※7 大容量化、1 年を超える信頼性、COP (Coefficient Of Performance : 冷凍効率) 0.1 を達成する高効率化等。
- ※8 磁性物質の吸着・着脱等を行う装置。土壌浄化や火力発電所のスケール除去等、様々な目的で利用される。

## 2章

## 高温超電導 (HTS) 技術の置かれた状況

## 2-1

## 技術開発の動向 (電力分野)

## (1) 電力ケーブル

HTS 電力ケーブルは、電気抵抗がほぼゼロである超電導の性質を利用した電力ケーブルであり、低電圧で大電流を通電できる、及び送電損失がほぼゼロであるという利点がある。加えて、従来の CV ケーブル (Cross-linked polyethylene insulated Vinyl sheath cable : 架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル) と比べると、同じ送電容量であれば小径化できることも利点の一つである。電力需要が増加傾向にある都心部では送電の地中化が進んだこともあり、送電線の増設には新たに洞道や管路を敷設する必要があるが、従来の送電ケーブルを HTS 電力ケーブルシステム (主に HTS 電力ケーブルと冷却システム<sup>※9</sup>から構成されるシステム) に置き換えると、このような洞道や管路の新設が不要となり、ケーブル敷設にかかるコストを低減できる。

従来の電力ケーブルシステムから HTS 電力ケーブルシステムへの転換需要を獲得するためには、HTS 電力ケーブルに加えて、それを断熱し、冷却するための管路を短期間に低コストで長距離に渡って施工するための技術、クエンチ<sup>※10</sup>をはじめとする異常時の対策や冷凍機を中心とする冷却システムの信頼性 (例えば、耐久性 5 年間以上でメンテナンスフリー) の向上とコスト低減が課題である。現在、NEDO が実施中のプロジェクトにおいて、これらの課題解決を図っているものの、社会実装のためには冷凍機及び冷却システムのコンパクト化や冷却可能な距離の延伸等が課題として残されている。具体的には、現在流通している液体窒素ポンプでは性能が不十分 (ポンプ効率 40% 以下、最大揚程<sup>※11</sup> 50m 以下) であり、延伸化 (冷却ステーション間隔を数 km に想定) のためには液体窒素ポンプの性能向上 (ポンプ効率 50% 以上、最大揚程 100m 以上) が必要である。また、冷凍機については、性能・信頼性と小型化・低コスト化には一般にトレードオフの関係があることから、社会実装のためには技術面でのブレークスルーが必要である。

更に、国内での実証プロジェクトと海外での実証プロジェクトを比較すると、国内では、HTS 電力ケーブル、冷凍機等のコンポーネントごとに最適化を図り、それらを組み上げてシステムとして成り立たせているが、海外では、ケーブルメーカーの NEXANS (フランス) や韓国電力など

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

が、HTS送電システムとして性能や品質を保証する、いわゆるシステムインテグレータとして活躍している。すなわち、我が国にはインテグレータが不在であり、今後、HTS送電システムの海外展開を視野に入れると、現状のコンポーネントごとの製品供給では国際競争力上の懸念がある。このため、HTS送電システムの開発においては、海外展開を見据えた開発体制とインテグレータの育成が求められる。

※9 HTS電力ケーブルに液体窒素を循環させるため、主に冷凍機とポンプから構成されるシステム。

※10 何らかの原因により超電導現象が消失すること。

※11 冷媒ポンプから生じる圧力を、水などの流体を揚げる高さで表したもの。

## ①冷却システム

極低温冷却のための冷凍機は、蓄冷器式と熱交換器式に大別でき、蓄冷器式にはスターリング冷凍機、ギフォード・マクマホン(GM)冷凍機等がある。スターリング冷凍機は、気体の膨張と圧縮を行う機構を組み合わせることで低温域と高温域の温度差を生じさせて冷熱源を得るものであり、冷凍機の構造が簡単(圧縮機・膨張機・蓄冷器で構成)という利点があるが、COP(冷凍効率: Coefficient Of Performance)は高くなく、小容量の冷却に向くとされる。一方、気体の膨張によって冷熱源を得る熱交換器式冷凍機にはプレイトンサイクル冷凍機等があり、大容量の冷却においてはスターリング冷凍機に比べてCOPが高いという利点があることから、更なる高効率化(COP向上)に対する期待が大きい。

NEDOでは「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」において、液体窒素温度(77K, -196℃)でのCOP=約0.1を誇る大容量(約5.8kW)のプレイトンサイクル冷凍機を開発し、東京電力旭変電所にて実運転試験を行うことに成功した。

なお、冷凍機には、温度、冷凍能力、効率などの性能に加えて、長期連続運転が可能な高い信頼性、ランニングコスト及び設置コストの低減、小型化等が求められる。特に、地中送電システムにHTS電力ケーブルを導入する場合に、変電所間に低温を維持するための冷凍機を設置しなければならなくなると、その設置スペースの確保は導入を制約する要素となるため、冷却システムの中継距離の延伸が重要な課題となっている。

## ②電力ケーブルシステム

電力インフラに新技術が採用されるには、システム全体の信頼性が重要視される。表1のとおり各国において実証プロジェクトが活発に実施、又は計画されている。数キロメートルの送電区間を有する商用規模のものが増えてきていることが近年の傾向であり、商業運転が近づいていることを示している。

中でも米国では、DHS(Department of Homeland Security: 国土安全保障省)がHTS電力ケーブルの技術開発と実証を進めている。多くの国では、単一の設備事故で供給支障が生じないための系統信頼度の基準を設けているが、米国では複数の設備事故でも供給支障が生じないような新たな基準を設けることが検討されている。DHSでは、大容量で送電することが可能なHTSケーブルを用いて送配電線を増強することがその新基準に対する効果的な手段の一つとなり得ると考えており、その基準に備えるために、約5kmのHTS電力ケーブルをComEdの電力系統に敷設して実証を行うことを予定している。

NEDOでは、既にHTS電力ケーブル(Bi系線材)を用いた小規模(送電区間240m)の実証プロジェクトを実施した。現在は、本実証を通して抽出された課題を解決するための技術開発を実施している。

## (2) 電力関連周辺機器

発電機や限流器等の機器について、米国、欧州、ロシア、中国、韓国において原理実証や技術開発に関するプロジェクトが進行中である(表2-1、表2-2)。特に、EUでは、ECCOFLOWプロジェクトにおけるY系線材を用いた限流器開発、イタリアのRSE(Ricerca sul Sistema Energetico)におけるBi系線材を用いた9kV/3.4MVAの限流器を開発(RdS(Ricerca di Sistema)からの支援による)、及びA2A(A2A Reti Elettriche)の中圧配電網における実証試験など、限流器の開発が積極的に進められている。

韓国は、線材から電力ケーブル、機器開発まで一貫した研究開発に多額の研究開発投資を行い、急速に追いつけている。特に電力分野では、2011年から2016年まで、毎年約1,200万\$を投資している(図3)。

NEDOでは変圧器、SMES等の技術開発を行い、試作機を完成させている。

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

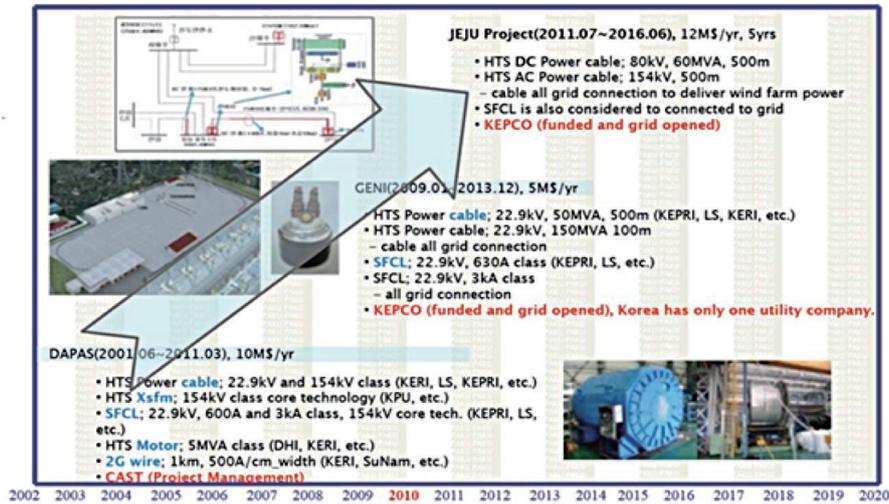


図3 韓国におけるHTS電力機器の開発プロジェクト

出所：ISTEC WEBサイト (2013)

表1 高温超電導送電ケーブルに関する国内外の主な実証プロジェクト (電力用途・輸送用途)

国	プロジェクト	実証系統	線材	m	電圧・電流	備考
日本	NEDO高温超電導ケーブル	Grid (東電旭変電所)	Bi	240	AC66kV-3.0kA	2012/10~2013/12
日本	JST鉄道総研き電線	鉄道総研構内試験線	Bi	30	DC1.5kV-5.0kA	2013/4~
日本	MLIT鉄道総研き電線	鉄道総研構内試験線	Bi/Y	310	DC1.5kV-1.0kA	2014~
米国	LIPAプロジェクト	Grid (送電線)	Bi/Y	600	AC138kV-2.4kA	線材: AMSC ケーブル: NEXANS
米国	Hydraプロジェクト	Grid (送電線)	Y	200	AC13.8kV-4.0kA	線材: AMSC ケーブル: Southwire
米国	Chicagoプロジェクト	Grid (配電線)	Y	5000	AC20kV程度	第1フェーズ: 2014~ 第2フェーズ: 2015~ 第3フェーズ: 2019~ 線材: AMSC
メキシコ	CASATプロジェクト	水力発電所引出	Bi	17	AC50kV-3.0kA	
ドイツ	Ampacityプロジェクト	Grid (配電線)	Bi	1000	AC10kV-2.3kA	2011-2016 線材: 住友電工 ケーブル、 限流器: NEXANS 実証中で最長
オランダ	Neuronプロジェクト	Grid (送電線)	?	6000	AC50kV-3.0kA	2011-2016 (計画見直し、休止中) nkt (デンマーク)
オランダ	Super cableプロジェクト	Grid (送電線)	?	2000-4000	150kV	2015-2019 計画検討中
欧州	BEST PATHプロジェクト	Grid (送電線)	MgB <sub>2</sub>	30	DC320kV-10kA	2014-2018 線材: Columbus (伊国) ケーブル: NEXANS 冷凍システム: TU Dresden
ロシア	サンクトペテルブルク	Grid (系統連系)	Bi	2500	DC20kV-2.5kA	2015-2020
中国	雲南プロジェクト	Grid (変電所)	Bi	33.5	AC35kV-2.0kA	線材:AMSC ケーブル:Inno Power (中)
中国	甘肅省全超電導変電所	Grid (変電所)	Bi	75		2011-2015 SMES:0.5MVA、限流器220kV、 変圧器630MVA オール超電導変電所
中国	国家電網プロジェクト	Grid (送電線)	Y	1100	AC110kV	計画検討中
韓国	DAPAS(2)	試験所	Y	100	AC154kV-3.75kA	試験中 線材:AMSC ケーブル:LS (韓)
韓国	GENI	Grid (Icheon変電所)	Y	500	AC23kV-1.25kA	終了 線材:AMSC ケーブル:LS (韓) 限流器: SuNAM (韓)
韓国	JEJU	Grid(GuemAk C/S)	Y	500	DC80kV-6.25kA	2014設備竣工 500MVA
韓国	JEJU	Grid(GuemAk C/S)	Y	1000	AC154kV-1.87kA	2015系統連系予定 500MVA

出所：NEDO技術戦略研究センター作成 (2015)

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

表2-1 高温超電導応用機器に関する国内外の主なプロジェクト(電力関連周辺機器、エネルギー・産業用途)

国	プロジェクト	対象機器	実施者	備考
日本	船用モータPj (NEDO)	船用モータ	住電、川重他	3 MW用レーストラック試験完了、Bi系
	MPACC-Pj (リチウム系 超電導電力機器技術開発) (NEDO)	SMES	中電他	2GJ級SMES用コイル要素技術開発、 2008-2013
		変圧器	九電、富士電機、大陽日酸、 ISTEC他	66kV/6.9kV-2MVA 級変圧器、Y系、 2008-2013
	高温超電導コイル基盤技術開発 Pj (METI)	マグネット	ISTERA、東芝、三菱電機、古河	MRI、加速器用、基礎検討用マグネット、 9M\$/年、Y系、2013-2017
	S-Innovation-Pj(JST)	NMR	日本電子、物材機構他	NMR用磁石への高温超電導応用
		加速器	東芝、京大他	医療用加速器への高温超電導応用
		船用モータ	川重、上智大他	20MWモータへの高温超電導応用
		SQUID	日立、九大他	バイオ、医療応用
		鉄道用ケーブル	鉄道総研、東大他	低損失化、実証
	先端計測：コンパクト3テスラMRI 装置の開発 (JST)	MRI	京大 高次脳機能総合研究センター	MRIの設計、試作、Bi系、2013年終了
強磁場コラポラトリー計画 (文科省MEXT)	強磁場マグネット	東北大、東芝他	Y系長尺線材による無冷媒25Tマグネット、 2014年完成予定	
高温超電導SQUIDを用いた資源探査 システム用磁力計の開発	SQUID	JOGMEC(石油天然ガス・金属鉱物 資源機構)、ISTEC、三井資源開発(株)	資源探査用SQUID、1M\$、2009-2012	
風力発電高度実用化研究開発 (NEDO)	風力発電用発電機	産総研、古河電工、前川製作所	概念設計と要素技術開発を実施中、 2013-2014	
安全・低コスト大規模蓄電 システム技術開発 (NEDO)	フライホイール	鉄道総研、古河電工、クボテック、 ミラプロ、山梨県企業局	Y系高温超電導線材による大型フライホイール 用の高温超電導マグネット、2011-2015	
米国	DOE ARPA-E REACT project	SMES	Super Power/ABB/Brookh aven ational Lab.他	2MJSMES、YBCO、2010-2012
	DOE/SCE(Super LimtterTM)	限流器	AMSC/Siemens/SC E/Nexans/Univ, of Houston]	YBCO、2007-2013
	DOE Smart Grid Demo (SGDP)	限流器	Super Power/SPX/Univ. of Houston/Edison他	YBCO、2010-2015
	Central Hudson	限流器	NYSERDA/Three - C/ElectricalCo/ Central Hudson/Super Power/ Applied Materials, Inc	YBCO、2014年6月から1年間
	DHS	限流器	DHS/AMSC	総額は約60 億円、2014から3年半
	DOE Smart Grid Demo	変圧器	SuperPower、SPX、Waukesha Electric、Univ. of Houston Southern California Edison	\$ 10.7M、2010-2014、28MVA-3 相限流機 能付変圧器 (69kV/12.47kV) (Y系)を開発し 実系統へ導入
	DOE ARPA-E Pj	SMES	ABB、Brookhaven National Lab、 SuperPower	\$5.25M(内\$4.58、SMES (Y系、20kW、3.4MJ) 開発 DOE) 2010-2014
	DOE EERE-Wind Pj	風力発電機	AML Emerson, Argonne, Creare, Univ. of Houston, Ecometric Technologies	全超電導風力発電機開発(10MW)の設計、 MgB2、\$ 2 M、2011-2014
	DOE Office of Science Pj (High Energy Phys, Fusion Energy Science)	高磁場マグネット	フロリダ州立高磁場研他	32T REBCOコイル、-2015

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

表2-2 高温超電導応用機器に関する国内外の主なプロジェクト (電力関連周辺機器、エネルギー・産業用途)

国	プロジェクト	対象機器	実施者	備考
EU	ECCOFLOW Pj	限流器	Nexans, RSE, A2A等	
	—	限流器	RSE, A2A等	Rd5からの支援、9kV/3.4MVA級限流器(Bi系)を開発
	Suprapower Pj	風力発電機	tecnalia, Acciona, Columbus, Oerlikon-Leybold, Univ. of Southampton, KIT	10MW以上のHTS風力発電の開発 ギアなし MgB <sub>2</sub> 冷却系R&D (KIT) 建設費10MWで€2.8M以下、€5.4M 2012-2016、(EU-FP7)
	INNWIND.EU Pj	風力発電機	Siemens, Suzlon, Gamesa, DTUほか27機関	10-20MWの高効率洋上風力、€13.8M、2012-2017 (EU-FP7)
	EcoSwing	風力発電機	Nexans, KIT, RWE, Vattenfall	€13.8M、2015-2019(EU-Horizon2020)
	Hydrogenie Pj	水力発電機	GE Power Conversion (旧: Converteam UK)、E.On Wasserkraft, KEMA Nederland, Stirling Cryogenics & Refrigeration, Politechnika Slaska, Zenergy Power, Cobham CTS	€3.46M、2006-2010 (EU-FP6)、 軽量、高効率発電機の開発、Heガスを使った冷却
ドイツ	ENSYSTROB Pj	限流器	Neans/Vatrnfall Boxbur	2009～、抵抗発生型、12kV800A、YBCO、発電所保護用
	AmpaCity Pj	ケーブル限流器	RWE, Nexans, KIT, Siemens	€13 M (ドイツ政府から補助)、2011-2015、10kV/2.3kA級抵抗型限流器(Y系)開発
	HTS-Geno Pj	発電機	Siemens, KIT	€4M、2011-2014、大型回転機2G界磁とテストリグ
ロシア	Superconducting Industry/Innovative Energy	限流器	ROSATOM	DC3.5kV/AC35kV級抵抗型限流器(Y系)の開発、2011-2015
		変圧器		1MVA級変圧器の開発
		エネルギー貯蔵		超電導軸受フライホイール(5-20MJ)の開発
		モータ		モータの開発
		発電機		発電機(1-10MW)の開発、2011-2015
		SMES		SMES(1-5MJ)の開発
		電流リード		12kA電流リードの開発
中国	甘肅省全超電導変電所Pj	変電所全体 (SMES, 限流器 (SFCL), ケーブル, 変圧器)	中国科学院電工研究所(IEE CAS), Innopower, Jiangsu Zhongtian Technology, China XD Group 施設: 甘肅省白銀市	全体2011年完成、2012年1月運転開始、2015年完了予定 (各開発時期SFCL2012年、SMES2011年など)
	限流器Pj×4	限流器	Innopower社、Shigezhuang Substation (天津)、上海大学	Innopower社限流器は2005-2007年に装置開発、現在運転中
	SMES①Pj	SMES YBCO	中国科学院電工研究所, China XD Group	2012-2015、> 1 MJ限流器を開発中
	SMES②Pj	SMES YBCO	China EPRI	6.9kJ限流器を開発中
	モータPj	モーター	中国船舶重工集团公司第七二研究所	1 MWモータの開発、科学技術省科技部のプロジェクト
韓国	DAPAS	154kV変圧器、限流器、5MVAモータ	KERI, SuNam, KEPRI, LSCable 他	€4.6M、2010-2013 (EU-FP7)、16.5kV/1kA級、24kV/1kA級抵抗型限流器(Y系)の実系統導入を計画(2013)
	GENI	22.9kV, 630, 3kA 限流器	KEPRI, LSCable他	5 M\$/年、2009-2013
	基礎研究	誘導加熱器	KERI他	ビレット等加熱用DC加熱器の開発
	個別開発	限流器	KEPRI, KIMM, KIT (独)、Hanyang大	\$ 8M、2011-2016、> 154kV/2kA級限流器(2015)をJeju島の実系統に導入する
	個別開発	リアクトル	Uiduk Univ. Changwon大、Vector Field Korea	\$1.5M、2011-2014、DCリアクトル (AC-DC変換用) 常電導機の1/10のサイズ、低損失を目指す
	基礎研究	誘導加熱器 発電機 風力発電機	KERI - DOOSAN, KERI, POSCO	ビレット等加熱用DC加熱器 2MW級潮流発電用発電機の設計検討中 2013-2016、10MW風力発電機

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

## 2-2 技術開発の動向（産業・輸送等分野）

日本では、輸送用途へのHTS技術の適用を見据え、鉄道き電線にHTS電力ケーブルを適用する検討が鉄道総合技術研究所において実施されている(表1)。また、その他のエネルギー・産業用途として、風力発電機やMRI、医療用や科学研究用の加速器、NMRなどに適用するための強磁場マグネット等に関する原理実証や技術開発の取組が文部科学省や科学技術振興機構(JST)、経済産業省、NEDOで行われている。海外では、モータへの適用のほか、大型加速器等の特殊用途への適用に向けた取組も行われている(表2-1、表2-2)。

HTSを適用した機器の実用化を早期化する上では、各機器の市場規模やその機器の我が国の優位性等を分析することに加えて、機器を適用する側のHTSに対するニーズを認識し、それをマイルストーンに置いた技術開発を行うことが重要である。また、HTS線材のコスト低減のためにも、産業政策上、重要と目される高付加価値製品(高磁場コイル・磁石を活用した製品)や早期実用化が期待できる小型コイルを活用した機器等の開発を視野に入れる必要がある。

## 2-3 技術開発の動向（線材）

1986年に、従来の極低温と比較して高温域で超電導特性を示す物質が発見されて以降、臨界温度 $T_c$ が90K(-183℃)程度のY系、110K(-163℃)程度のBi系の銅酸化物系超電導体が相次いで発見されてきた。これらはLTSに比べて圧倒的に高い $T_c$ と上部臨界磁場 $H_{c2}$ (第2種超電導体<sup>\*12</sup>において超電導状態が破壊される磁場)を有する。安価な液体窒素(77K, -196℃)による冷却が利用できるほか、冷却に必要な電力が理論的には約2割<sup>\*13</sup>削減できることから省エネ性が期待できるため、更には高磁場化が可能であるため、HTSを産業応用することはLTSに比較して圧倒的に優位である(表3、図4)。

また、HTS線材においては一般に、臨界電流密度(超電導体に電気抵抗がゼロの状態ですることのできる単位断面積当たりの最大の電流値) $J_c$ がLTSに比べて大きいことから、大電流化が可能であるという利点もある。更には近年、超電導体の特徴の一つであるピン止め効果が第2種超電導体の $J_c$ を上昇させる要因となっていることを利用し、これを人工的に得る「人工ピン」と呼ばれる技術を導入した高 $J_c$ 線材の開発も進んでいる。

\*12 第1種超電導体は磁場の上昇により一気に超電導状態が壊れる超電導物質、第2種超電導体は常電導部が部分的に存在している超電導物質。多くの合金、及び高温超電導物質のほとんどが第2種超電導体。

\*13 計算式：  

$$(1 - |\text{冷却時の液体窒素温度}(\text{℃})| / |\text{冷却時の液体ヘリウム温度}(\text{℃})|) \times 100 = (1 - 209/269) \times 100 \approx 20(\%)$$

表3 超電導材料の種類と特徴

温度	材料	臨界温度	製造方法	材料特性	特徴
高温 (HTS)	銅酸化物系 -Bi系 (1988年:発見) (1996年:長尺線材)	110K 液体ヘリウムに比べて低コストの液体窒素温度(77K)で利用可能である。	粉末充填/延伸 ・長尺化、量産性が確認されている。	・比較的、低磁場領域(～10T)での使用に適する。	・冷媒単価(数十円/ℓ)が安価であり、冷却コストが低い。 ・長尺化、量産性が確認されており、現時点で最も実用性の高い高温超電導材料である。
	銅酸化物系 -Y系 (1987年:発見) (2006年:長尺薄膜線材)	90K 液体ヘリウムに比べて低コストの液体窒素温度(77K)で利用可能である。	薄膜形成 ・Bi系に比べて必要とする貴金属が少なく、材料コストで優位である。 ・量産技術の確立まで今一歩である。	・高磁場下でも高い臨界電流特性を有する。	・材料コスト、材料特性ではBi系に対して優位である。 ・長尺化や量産技術の確立までは今一歩である。
	Fe系 (2008年:発見)	55K 液体水素温度(20K)で利用できる可能性がある。	—	・20～30T以上の高磁場中(@4K)での臨界電流特性が比較的良い。	・強磁場下での使用に有利であり、液体窒素温度までの使用温度域の向上やヒ素の代替ができれば、産業応用の可能性が広がる。
	MgB <sub>2</sub> (2001年:発見) (2004年:長尺線材)	39K 液体水素温度(20K)で利用できる可能性がある。	粉末充填/延伸 ・結晶粒同士の結合が良好であり、結晶粒の向きを揃えなくても良い。 ・原料が比較的安価である。	・機械的強度に優れる。 ・軽量である。	・良好な機械的特性は高磁場下での使用に有利であり、使用温度域が液体窒素温度まで向上すれば、産業応用の可能性が広がる。
低温 (LTS)	Nb <sub>3</sub> Sn (1967年:発見)	18K 液体ヘリウムでの冷却が必要なため冷却コストが高い。	延伸 ・材料の製造法が確立され材料コストも低く、安価に製造できる。	・高磁場下であっても比較的高い臨界電流特性を有する。	・線材は最も低コストで使用実績も豊富であるが、多くはコストの高い液体ヘリウム(1000円/ℓ以上)を必要とする。
	NbTi (1964年:発見)	18K 液体ヘリウムでの冷却が必要なため冷却コストが高い。			

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

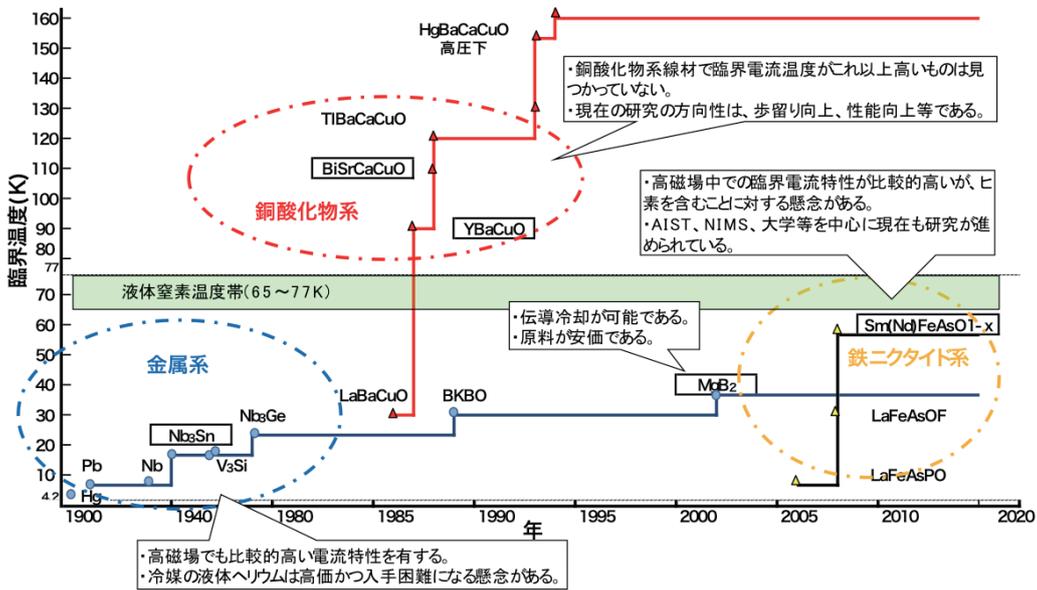


図4 臨界温度  $T_c$  (K)の変遷  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

## ① Bi系銅酸化物

臨界温度  $T_c$  が約 110K (-163℃) と高く、液体窒素での冷却による実用化が進められている  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  ( $\text{Bi}2223$ ) と、 $T_c$  は約 90K (-183℃) であるが液体ヘリウム温度であれば 24T を超えるような強磁場発生超電導磁石用として期待されている  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$  ( $\text{Bi}2212$ ) があり、これらは BSCCO とも呼ばれる。Bi2223 線材は、機械応力によって結晶の向きを揃えることが容易なことなどから、長さ方向にわたって特性のばらつきが少ない均質な線材が高い歩留りで生産可能である。Bi2212 線材は、銅酸化物高温超電導体の中では唯一、丸線形状で長尺の線材が作製されている。ただし、これらの Bi 系線材には被覆材として高価な銀が多く用いられることが線材価格の高止まりを招く要因の一つとなっている。

## ② Y系線材

Y系超電導体 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 / \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ ) は Y123 超電導体や YBCO とも呼ばれ、 $T_c$  が約 90K (-183℃) などの高い臨界特性を示すほか、線材に使用される銀の使用量が少ないため材料コストは Bi 系に比べて安価になると期待されている。しかし、生産技術が未熟なことから

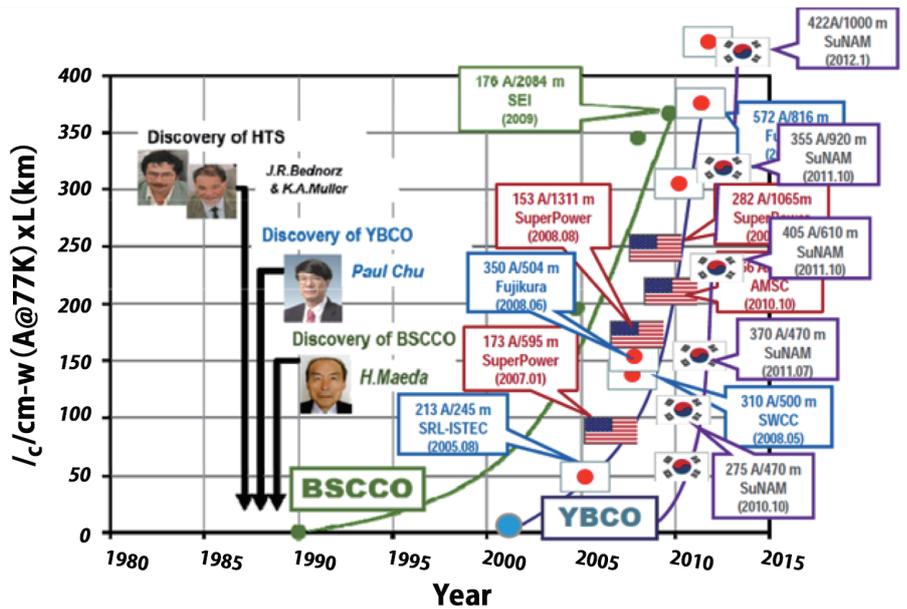


図5 超電導線材の開発の歴史 出所：ISTEC 資料等 (2014)

量産性が低い、線材価格の高止まりを招いている。Y123 超電導体は、結晶粒界の結合角が大きくなるにつれて  $J_c$  が大幅に低下する性質を有しているため、線材の製造工程では結晶の向きを揃えることも重要であり、量産性の向上を難しくする要因の一つとなっている。

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

日本においては、これまで臨界特性(特に、77Kの温度下で単位幅当たりの臨界電流の大きさとその長さに乗じたものから得る係数)を向上させるという性能向上を重視して線材の技術開発を進めてきた。図5に示すように、2000年代には米国と、2010年以降には韓国と競いつつ日本は世界の先頭を走るが、韓国のSuNAMは、2010年から約2年の間に性能向上に大きな進展をみせており、追い上げが激しい。

Y系線材の現在のコストはBi系線材の現行水準(10円/Am程度)より高めであり、普及段階ではその1/3から1/4(3円/Am未満)への低減が必要である。米国や韓国には、将来的には線材価格を1円/Am程度に低減することを公言している企業もある。Y系線材は、ハステロイ金属テープ材等の金属基板上に中間層、超電導層、保護層(安定化層や絶縁層を含む)を成膜させた層状構造であり、これらの薄膜を重ねて作製する。特に、中間層と超電導層を成膜することに技術的な難しさがああり、Y系線材の性能向上の歴史は、これらの成膜技術開発と共に歩んできた。

中間層の成膜には、IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)法、超電導層の成膜にはPLD(Pulsed Laser Deposition)法などの方法がある。SuNAMは中間層をIBAD法、超電導層をRCE-DR(Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction)法を

用いて成膜しており、長尺線材を高速で製造することを可能としている。同社は、将来的には線材の幅を360mmに標準化し、製造設備もこの幅での製造にそろえることによって線材価格を約1円/Am程度に低減することを目指している。AMSCは、中間層をIBAD法ではなくRABiTS(Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate)法、超電導層をMOD(Metal-Organic Deposition / Decomposition)法で成膜し、その過程で人工ピンも導入可能としている。加えて、古河電気工業(SuperPower)は、IBAD法で得た中間層に、MOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)法で超電導層を成膜しており、人工ピンを数百メートルの長さにわたり均一に入れられることを強みとしている(表4)。

最近では、EUのEUROTAPESプロジェクトにおいて、インクジェット印刷による高温超電導体を含んだ絶縁テープやワイヤの製造法が開発された。この手法は、従来と比べて、製造コストを大幅に削減できる可能性を有している。また、D-nano(Deutsche Nanoschicht,ドイツ)はKIT(Karlsruhe Institute of Technology,ドイツ)大学とともにジョイントラボを設立、2015年初頭に運用を開始し、線材製造のスピードアップ及び性能向上や長尺化のための研究として、成膜上の反応速度や $J_c$ の向上、新たな化学的蒸着技術の試験等を行う計画である。

表4 各企業等におけるY系線材の成膜法

国	企業等	成膜法		材料	
		超電導層	中間層		
日本	ISTEC	PLD	IBAD	EuBCO+BHO(人工ピン)	
		MOD	IBAD	YGdBCO+GZO(人工ピン)	
		TFA-MOD	IBAD	YGdBCO+BZO(人工ピン)	
	昭和電線	MOD	IBAD	YGdBCO+GZO(人工ピン)	
	フジクラ	PLD	IBAD	GdBCO	
	SuperPower	MOCVD	IBAD	GdBCO+BZO(人工ピン)	
中国	上海大学	SuperOx	PLD	GdBCO	
			PLD	IBAD	REBCO
			MOCVD	-	-
韓国	SuNAM	MOCVD	-	-	
		RCE-DR	IBAD	GdBCO	
		HR-PLD	ABAD	YBCO+Pin(人工ピン)	
欧州	Bruker	MOD	RABiTS		
		THEVA	ISD	GdBCO	
		ICMAB, Oxolutia	CSD(IJD)	RABiTS, ABAD	YBCO
米国	AMSC	MOD	RABiTS	YDyBCO+Nano Pin(人工ピン)	
		STI	RCE-CDR	IBAD	REBCO

出所：NEDO技術戦略研究センター作成(2014)

\* PLD (Pulsed Laser Deposition) :

パルスレーザー堆積法。ターゲット上にレーザーパルス光を集光させ、レーザー光のエネルギーによって励起されて飛び出すターゲット物質を、ターゲットに対向する位置に置かれた基板上に堆積させて薄膜を形成する方法。

\* MOD (Metal-Organic Deposition / Decomposition) :

有機金属熱分解法。有機金属化合物を基板に塗布し、熱処理により金属あるいは金属化合物などの無機材料(薄膜)を合成する方法。

\* TFA-MOD :

原料としてTFA(トリフルオロ酢酸)化合物(錯体)を用いたMOD法。

\* MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) :

有機金属気相成長法。化学反応により基板上に有機金属の薄膜を形成する化学気相蒸着法。

\* RCE-DR (Reactive Co-Evaporation by Deposition and Reaction) :

反応性共蒸着法。基板上に一原子層分の厚さ(モノレイヤー)の貴金属層を同一の成膜装置内で連続して成膜し、更に、その貴金属薄膜上に絶縁体薄膜を同一の成膜装置内で連続して成膜する方法。

\* HR-PLD (High-Resolution Pulsed Laser Deposition) : PLD法の改良方式。

## 超電導分野の技術戦略策定に向けて

\* ISD (Inclined Substrate Deposition) :

基板傾斜成膜法。レーザ蒸着法又は電子ビーム蒸着法において、ターゲットに対して基板をある角度を持たせて成膜することにより、他に特別な操作を行うことなく成膜後の材料の結晶方位を3次的にそろえる(二軸配向させる)方法。

\* CSD(IJD) (Chemical Solution Deposition (using Ink Jet Deposition)) :

インクジェットを用いた化学溶液法。原料を溶媒で希釈し、インクジェットを用いて基板上に直接溶液を滴下し、基板上に溶液を塗布する方法。

\* RCE-CDR (Reactive Co-Evaporation Cyclic Deposition and Reaction) :

RCE-DR法の改良方式。

\* IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) :

イオンビームアシスト蒸着法。成長中の薄膜表面にイオンビームを照射しながら成膜を行うことにより、成膜後の材料の結晶方位をそろえる方法。

\* ABAD (Alternating Beam Assisted Deposition) :

交互イオンビーム照射蒸着法。IBADの改良法。

\* RABITS (Rolling Assisted Bi-axially Textured Substrates) :

圧延等によって結晶方位をそろえた配向金属基板上に材料の成膜を行う方法。

③ MgB<sub>2</sub>、Fe系等線材

MgB<sub>2</sub>線材は、機械的強度が高く軽量であること、結晶粒の向きを揃えなくても線材製造が可能なこと、材料費が安価なこと、 $T_c$ が39K (-234℃)と20K (-253℃) 近傍の比較的高い温度領域で使用できること、永久電流モード(超電導体でつくられた閉回路を外部起電力なしに流れる定常電流による機能であり、例えば、一度励磁した磁場が永久に同じ強さを保ち続ける効果などが得られる)が可能なことなどが利点として挙げられる。一方、昨今の技術開発によって改良はされてきているものの、 $J_c$ はBi系、Y系などの銅酸化物系に比べると臨界特性が低いことが課題である。

Fe系線材は、2008年に $T_c$ が大幅に上昇し50K (-223℃)を超えた。更に、銅酸化物系に匹敵する高い $H_{c2}$ を持つことが明らかになっている。Fe系線材は、Y系線材に比べて結晶粒界の結合角の増大に伴う $J_c$ の低下が緩やかであり、高度な結晶方位制御を必要としないため、歩留りの改善、コストを低減できる可能性がある。しかし、材料にヒ素を用いるため、普及に当たっては社会的な受容性が懸念される。

Fe系線材の組成としては、LnFeAsOに代表される1111系、AEFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>が属する122系、FeCh(鉄カルコゲナイド)の11系の3種類を対象に研究が多くなされている。1111系は $T_c$ が高いものは50Kを超える一方で、高純度な結晶を形成させることが困難であり、結晶形成がより容易な多結晶材料では実用に十分な $J_c$ 特性が得られていない。122系は、 $T_c$ が40K (-233℃)程度でありMgB<sub>2</sub>とはほぼ同等であるものの、 $H_{c2}$ がY系銅酸化物と同程度であることから、今後、使用温度域の向上、ヒ素の代替等ができれば実用に際して適用範囲が広がると期待されている。11系は、高純度合成は比較的容易であるが、 $T_c$ が10K程度と高くないため、実用を考えると適用範囲も絞らざるを得ない。

その他には、フラーレンやダイヤモンド等の数種類の物質が室温超電

導を実現できる等の新物質として期待されており、我が国では物質・材料研究機構(NIMS)や大学等を中心に研究がなされている。

## 2-4 産業競争力(諸外国との比較)

## (1) 市場規模(国内、海外)

現在、超電導技術を適用した機器の世界市場規模は年間約7,000億円といわれ、また、電線・ケーブルの世界市場が約20兆円(2013年見込み)であり(表5)、超電導電力ケーブルの実用化が進むことの市場に対する見通しなどは先述のとおりである。

なお、超電導電力ケーブルの国内での本格的な導入には10年程度を要すると見通されており、当面の導入先としては、POFケーブル(Pipe-type Oil Field Cable:例えば、東京電力管内では約250kmの巨長が敷設されている)の老朽化による取替えが候補として挙げられる。他の先進国においても老朽設備を取替えなければならない同様の状況があることから大きな需要が見込めるとともに、世界的に普及が進めば導入の早期化も期待できる。

また、近年の調査によると、HTSを適用した機器で、2014年から2030年までにMRI、NMRを中心に、国内外あわせて約14兆円の市場が形成されることが期待されている(表6)。

表5 電線・ケーブル市場の実績と予測

[単位:億円]	2012年	2013年 (見込み)	2017年 (予測)
電力インフラ	98,800	104,100	109,250
通信インフラ	15,300	16,280	18,730
電子機器	16,630	16,875	16,920
自動車	22,870	24,500	28,800
巻線/ マグネットワイヤ	22,530	24,580	30,020
その他産業用	9,740	10,310	11,150
	185,870	196,645	214,950

出所：富士キメラ総研「2014年版 次世代ワイヤ/ケーブル関連マテリアル市場調査総覧」(2014)

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

表6 超電導応用機器の潜在市場の推定

分野	応用機器		2030年単年(推測)[億円]		2014時点~2030年(累積)[億円]	
			国内	世界	国内	世界
産業・輸送	磁気分離装置	土壌浄化	30	30	445	445
		火力発電所スケール除去	9	9	48	48
	磁気誘導加熱装置		25	83	162	535
	船用モータ		46 (モータのみ)	858	185	3,490
	鉄道き電線		50	100	502	1004
	SQUID 応用製品(資源探査)		—	—	—	—
	産業用超電導モータ		131	1638	899	11199
	合計		1,575	14,716	17,376	142,809
診断・医療	MRI		965	9,903	12,000	107,000
	NMR(1GHz級は国内年間販売台数の1%と仮定)		121	930	1,530	11,530
	重粒子線加速器		60	60	420	420
エネルギー・電力	電力ケーブル(都市内送電)		105	401	1,047	3,993
	限流器		27	82	110	334
	風力発電機(10MW級)		6	661	28	3,304

出所：超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書(三菱総合研究所/NEDO, 2014)

## (2) 主なプレイヤー (国内、海外)

### ① HTS 線材

#### ● Bi 系線材

主な企業は、住友電気工業、Bruker (ドイツ) である。ただし、Bi2223線材の製造においては、製造工程に特徴を有する住友電気工業が独占の状態であり、今後もその状況は続くと思われる。

#### ● Y 系線材

主な企業は、古河電気工業 (SuperPower)、フジクラ、AMSC (米国)、SuNAM (韓国) であり、日米韓の競合状態にある。最近では韓国の技術的な猛追が著しいことに留意する必要がある。

#### ● MgB<sub>2</sub> 線材

主な企業は、Columbus (イタリア)、Hyper Tech (米国)、日立製作所であり、日米欧において実用化に向けた研究が進められている状況にある。

### ② 冷凍システム

#### ● 冷凍機

HTSの冷却に最適な冷凍機について、65K級のものを前川製作所、太陽日酸、Air Liquide (フランス) が、20K級のものを住友重機械工業等が開発を行っている。

#### ● 液体窒素ポンプ

バーバーニコルス (米国) が市場を独占している状態である。

### (3) 特許

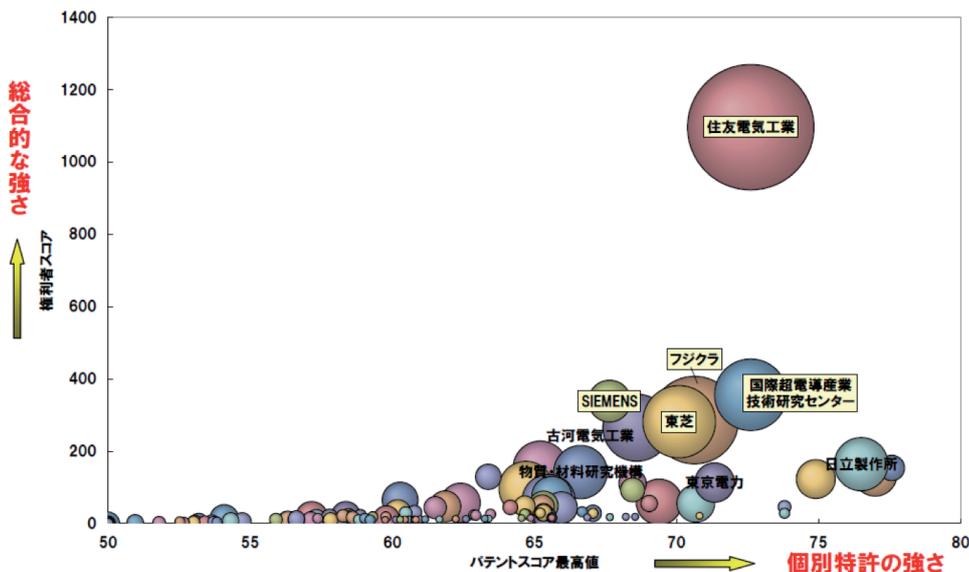
1993～2014年のエネルギー・電力分野の超電導技術に関する国内出願特許(約3万2千件)を対象とした分析結果の一例(図6)をみると、住友電気工業、フジクラ等の線材・ケーブルメーカーや東芝、日立製作所、三菱電機等の重電機器メーカー、国際超電導産業技術研究センター (ISTEC)、NIMS等の研究機関からの出願数が多いことがわかる。

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

また、2008年から2013年までの超電導技術に関する5極（日本、米国、欧州、中国、韓国）への特許出願（約8,600件）のうち、出願件数が多い12機関について出願人国籍別の出願先国の内訳をみると、住友電気工業は国内への出願を主眼としつつも多極に出願する傾向にあることが明らかにされている。これに対して、NEXANS（フ

ランス）は5極に均等に出願する傾向、中国科学院電工研究所（中国）は中国にのみ出願する傾向、GE（米国）は中国重視の傾向にあるなど、出願先傾向に各機関の特徴がある。また、多極に広く出願している出願人には、住友電気工業、NEXANSのほかISTEC、SIEMENS（ドイツ）、古河電気工業がある。

加えて、図7及び図8に示すように、超電導線材については、2008年以降の5極に対する出願人の多くは日本国籍であり、出願件数上位14機関のうち10機関を日本が占める。近年、線材開発で日米への猛追が著しいSuNAM（韓国）は、いまだ15位以下に位置する。



円の大きさ：有効件数  
 横軸（個別特許の強さ）：各権利者の特許群の中で最高値の特許スコア＝パテントスコア最高値  
 縦軸（総合的な強さ）：各権利者の特許群のスコアを合算した値＝権利者スコア  
 スコア算出対象の公報数：1,383件、権利者の数：842人

図6 超電導技術に関する日本国内への特許出願における出願人別のパテントスコアマップ (1993～2014年)

出所：特許・技術調査レポート 特定技術分野の競合分析【超電導分野】エネルギー・電力関連技術（パテントリザルト，2014）

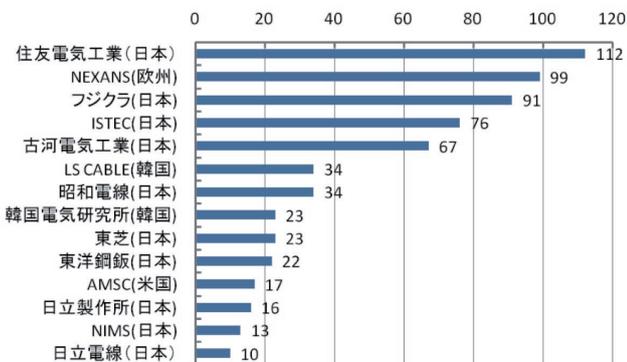


図7 超電導線材に関する5極への特許出願件数 (出願数上位14機関、2008～2013年)

出所：超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書（NEDO，2014）

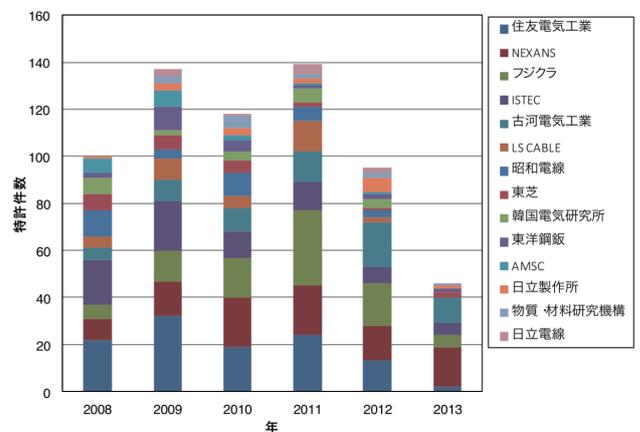


図8 超電導線材に関する5極への特許出願件数の年推移 (出願数上位14機関、2008～2013年)

出所：超電導機器の市場形成に資する技術戦略策定に向けた調査報告書（NEDO，2014）

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

## (4) 論文

### ①超電導線材

超電導線材に係る論文数においては、日本及び米国が長期にわたり上位に位置している。ただし、2010年以降、中国の追い上げが激しい(図9)。

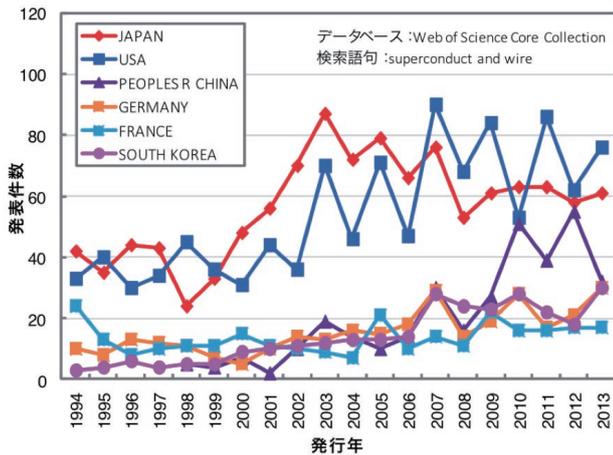


図9 超電導線材に係る論文発表件数の年推移 (発表機関国籍別)  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

### ②超電導技術全般

線材に関する論文数と同様に、超電導技術全般についても日本及び米国が長期にわたり上位に位置している。また、中国の追い上げが激しい近年の状況も同様である(図10)。

超電導物質別の論文発表動向をみると、従来のBi系及びY系に加えて、2001年以降、MgB<sub>2</sub>への注目が高まっているとともに、2000年代後半から、線材コストの低減や高磁場磁石への応用が期待されるFe(鉄)系に関する論文数が増加傾向にある(図11)。図11に示した各物質の論文数を発表機関国籍別に分類した図12をみると、近年の論文数が多いY系、Fe系、MgB<sub>2</sub>についてはいずれも日本、米国、中国が論文数の上位に位置していることがわかる(図12)。

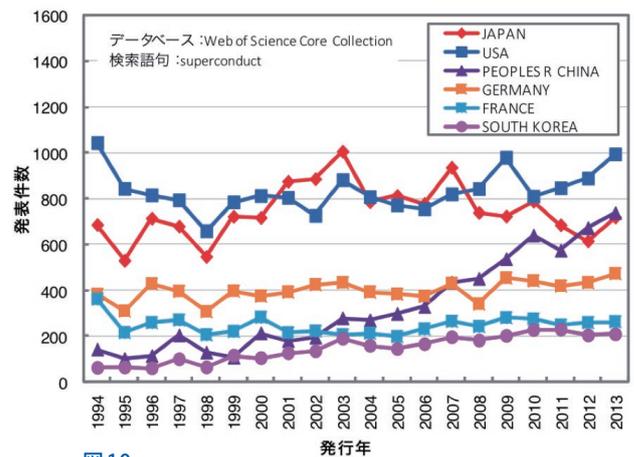


図10 超電導技術全般に係る論文発表件数の年推移 (発表機関国籍別)  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

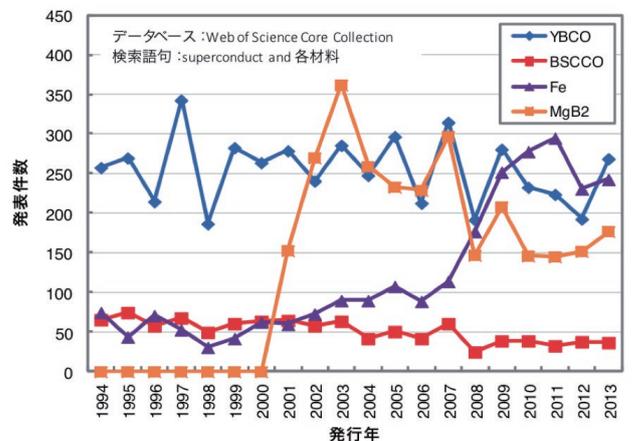
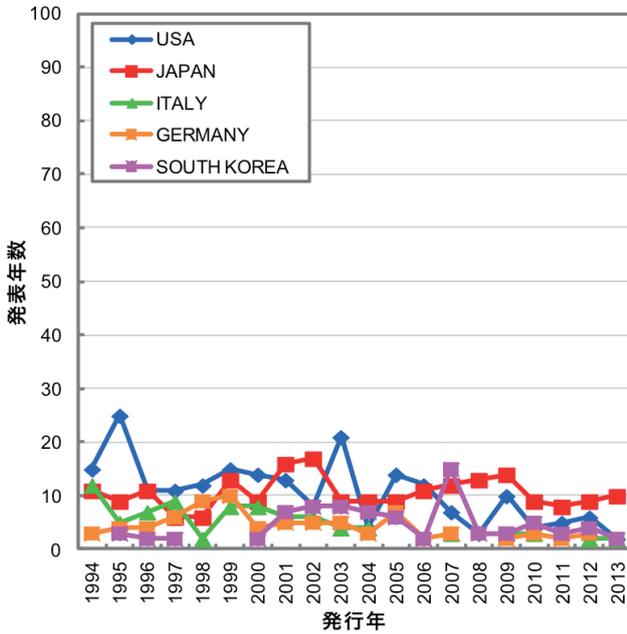
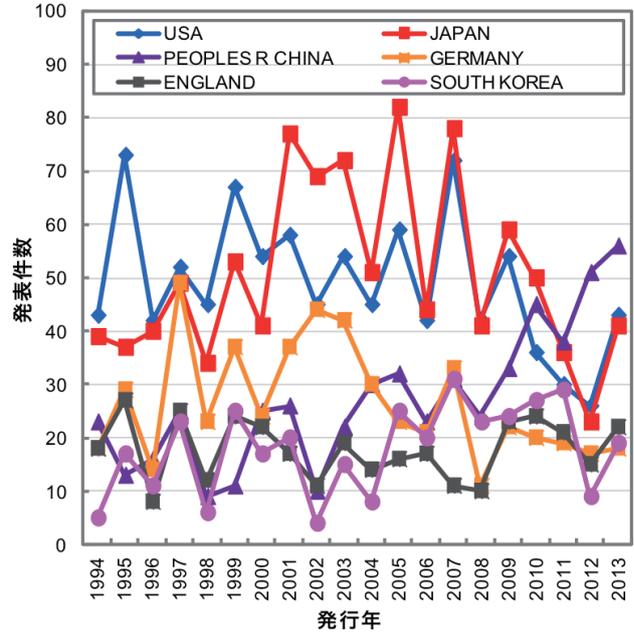


図11 超電導技術全般に係る論文発表件数の年推移 (超電導物質別)  
出所：NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

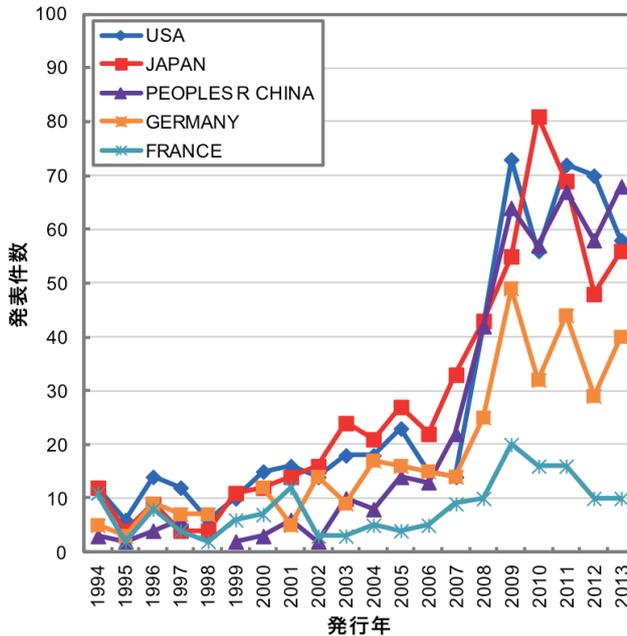
# 超電導分野の技術戦略策定に向けて



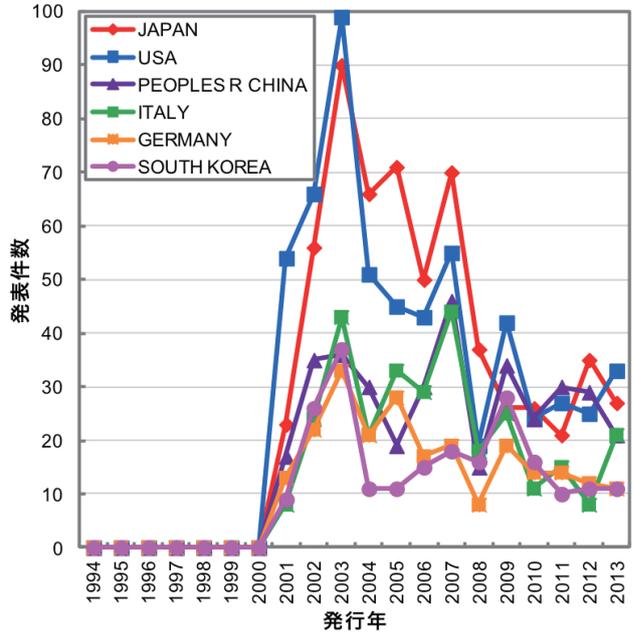
(a) Bi系 (BSCCO)



(b) YBCO系 (YBCO)



(c) Fe (鉄系)



(d) MgB<sub>2</sub> (ニホウ化マグネシウム)

図12

超電導技術全般に係る超電導物質ごとの論文発表件数の年推移 (発表機関国籍別)

出所: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2014)

## 3章 高温超電導 (HTS) 分野の技術課題

### 3-1 HTS 応用技術

前章までに記述してきたように、我が国は最先端の HTS 技術を有している。また、最近では各国の技術開発の進展による追い上げが激しい状況にもあることから、今後は、これまで培ってきた HTS 技術の実用化を一層推進することが望まれる。その主な用途分野と技術課題は以下のとおりである。

#### (1) 電力分野

インフラ市場の一つである電力分野への新技術導入においては、従来技術と同等以上の信頼性に加えて、付加価値が求められる。そのため、HTS の付加価値を生かしつつ、システムとして長期運用を見通せる安定性やコスト、あらゆる異常時にも堅牢であることなども含めた信頼性が確立できる技術開発や検証を行う必要がある。

#### (2) 産業・輸送等分野

超電導技術の利点は、従来技術では不可能な高電流密度や高磁界が得られる、従来技術に比べて省エネルギー・省資源となる、の2点に大別できる。このため、産業・輸送等分野においては、①超電導でなければ実現できない機器（例えば高磁界対応機器）、②超電導により省エネルギー・省資源が実現できる機器（例えば大電流対応機器）への適用が有効と考えられる。また、ヘリウム供給不足リスクへの対応策の一つとして、HTS による既存の LTS 機器の代替も有効と考えられる。

以上の観点から、今後の HTS 技術の適用が有望な製品として以下のようなものが挙げられる。

産業・輸送分野では、

- 磁気分離装置
  - ・ 土壌浄化（原子力事故等の環境修復のための土壌磁気分離等）
  - ・ 火力発電所スケール除去
- 低周波磁気誘導加熱装置
- 船用モータ

- 鉄道き電線
- SQUID 適用製品（資源探査）

診断・医療分野では、

- MRI
- NMR
- 粒子線加速器

エネルギー・電力分野では、

- 電力ケーブル（送電線）
- 限流器
- 風力発電機

なお、これらの機器に HTS 技術がこれまで適用されなかった、又は実用化に至っていない理由としては、従来技術に対する HTS 技術を導入したことによる優位性が、技術面だけでなく、経済性等も含めて十分に明確化にされなかったこと、HTS 技術を開発する側と利用する側、それぞれの視点とのマッチングやそのための具体的な議論が不足していたことが挙げられる。今後は、HTS 技術を導入することの現実性や導入したことによる効果、また、緊急性といった観点も踏まえて評価を行い、有望な HTS 技術の適用先を選び出すことが重要である。

### 3-2 HTS 線材技術

線材の安定供給と性能・品質の安定化はもちろん、線材の利用状況に応じた性能の向上とトータルシステムのコスト削減につながる低コスト化は非常に重要である。また、 $MgB_2$  等の新たな線材についても、実用化に向けた課題解決に関する技術開発が望まれる。

なお、一般に、実用化に向けた高温超電導の特性を表す指標である  $T_c$ 、 $H_c$ 、 $J_c$  の、三つの臨界特性が高いほど HTS 線材としての特性が優れるといえるため、そのような線材の開発が HTS の適用先を拡げることに繋がる。他方、それらの特性を単に向上させるのではなく、線材の利用状況に応じた製造条件の設定及び製造技術の開発等を行うことも必要である。

#### (1) Bi 系線材

インフラ市場の一つである電力分野への新技術導入においては、

# 超電導分野の技術戦略策定に向けて

線材自体は量産化が可能な技術水準に達しており、また、各種機器にも適用されるなど、ほぼ実用化されたと考えられる。

## (2) Y系線材

線材そのものを製造できる技術レベルには達したものの、研究開発用途の需要でさえも供給が追いついておらず、性能や品質も安定しないのが実情である。したがって、生産性向上等による低コスト化、産業機器等への適用拡大に資する線材形状の拡充、電流特性や機械強度等の更なる向上などが実用化に向けた課題である。また、 $J_c$ の向上は線材としてのインパクトが大きいことから、線材そのものの性能向上は引き続き取り組むべき課題といえる。

## (3) 新材料 ( $MgB_2$ 、Fe系等)

$MgB_2$ 線材など、2000年以降に見発された新しいHTS材料については、産業への展開が期待できるものについて量産化・低コスト化を見据えた線材の製造技術等の開発が必要である。また、 $J_c$ の向上等、線材そのものの性能向上も引き続き取り組むべき課題といえる。

マグネットなどの開発を性能の検証レベルまで行ってきたが、実用化には至っておらず、まだまだ少しの距離がある。この理由として、従来技術に対してHTS技術を導入したことによる優位性が、技術面だけでなく、経済性等も含めて十分に明確化されなかったこと、HTS技術を開発する側と利用する側、それぞれの視点のマッチングや、そのための具体的な議論が不足していたことが挙げられる。

これまで蓄積してきた我が国のHTS技術は、要素技術開発で得た成果をシステムに昇華する段階にあるといえ、そのためには、HTS技術の特徴が最も生かされる分野を、HTS技術を開発する側だけでなく、適用する側の要求も明確にした上で、システムとして最適化する技術開発が必要である。これに加えて、システムに関する技術開発の成果を適度なタイミングで実証するとともに、HTS線材、とりわけY系線材について、長尺化や生産効率（品質や歩留り、生産速度）の向上等を図ることを目指した基盤技術開発に総合的に取り組むことが望ましい。

## 4章 おわりに

HTS技術は、電気抵抗がほぼゼロであるという性質を活用することによって電流が流れる際の損失を抑えられるほか、高磁場を発生させることが可能であり、省エネルギー技術や新たな産業技術としての期待が大きい。また、LTSを適用した機器の冷却に必要な液体ヘリウムの供給逼迫の懸念がされる中で、液体ヘリウム以外での冷却も可能であり、冷却等に係る電力の省エネ（理論的には約2割）が図られることからLTSからの置き換えも期待されている。加えて、HTS線材のうちY系線材を活用すれば、圧倒的な高磁場化や高性能化等も期待できる。

HTS線材について、これまで我が国はBi系線材の量産化及びY系線材の性能向上において約30年にわたる研究開発を推進し、その成果として、線材製造の基盤技術が確立された。このHTS線材製造技術については、我が国の技術的な優位性を世界に誇れる状況にある。諸外国では、HTS技術の利用を目指した電力機器等の開発や実証が活発に行われるようになり、機器開発に軸足が移りつつあると見られる。我が国ではHTS技術を利用する場として、商用電力や鉄道用電力などの送電、電力貯蔵、モータ、発電機、高磁場

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。引用を行う際は、必ず出典を明記願います。