

低温工学領域におけるマーケットの出現

中原住雄

1 はじめに

一般に自然科学は、身近な生活環境での素朴な疑問を解き、夢を実現するため、物の性質を研究することに始まり、より特殊な環境に新しい研究の場を求めていくものである。その研究に必要な技術が開発され、研究成果が新しい技術を生み出す。例えば、高温の分野では、金属の融点付近から核融合点火の超高温へ、高圧では、金属の成形からダイヤモンドや天然に存在しない物質合成のための超高圧へ、真空でも、断熱真空から、単位空間に分子が1, 2個しか存在しない超高真空へ、各々、科学・技術の研究の場が広げられてきた。

低温の分野でも、冷却技術の発達と相補的により低い温度での科学研究と技術の確立が進行している。既に確立された、またはその過程にある技術を温度順に列記すると、農水産物の冷蔵冷凍技術、極寒地の船舶・車両・航空機など運搬機器や土木建築材料、宇宙開発における人工衛星・宇宙ステーションなどの宇宙構造物、天然ガスの液化・運搬技術、ロケットの液体燃料に関する技術などである。

これらの延長上にあり、ここ10数年間で急速な発展を遂げ、各分野から注目されているのは、20世紀の最も重要な科学的発見の一つである超電導である。その技術においてジュール損失無しに大電流を流せるという特徴は、あらゆる分野に応用される可能性があり、その寄与するところは大で

あると考えられる。ただ、現在この技術は発展途上にあつて、すぐに何処にでも応用するというわけにはいかない。また、欠点としては、低温下でない超電導状態は得られないということである。1986年の高温超電導体 (HST) が発見され、エネルギーやエレクトロニクスを代表とする様々な分野において地球的規模での経済的な効果が生まれることが期待された。より高温で超電導状態になる物質の探求が続けられてきた結果、近年ではいくつかの酸化物超電導物質が液体窒素温度 (77 K) 以上で超電導になることがわかってきたが、これらは超電導線の成形がコスト高であり、また大電流を流せないなどの問題が解決されておらず研究が続けられている。したがって、現在実用化されている超電導物質は、Nb-Ti 合金 (臨界温度 \approx 9 K) と Nb₃Sn の金属間化合物 (臨界温度 \approx 18 K) であり、実際には絶対零度に近い液体ヘリウム温度 (4.2 K) で使用される。

現在、超電導技術の恩恵を受けるには、液体ヘリウム温度付近での材料や取扱技術が必要である。これらの困難にもかかわらず、素粒子研究施設の加速器や検出器周辺では何千個もの超電導磁石が使用され、また、超電導磁石を用いた医療用の核スピン共鳴利用診断装置 (MRI) が市場に出回り始めた。前者は研究施設であるから低温技術をもった技術者が運転するが、後者やこれから応用される分野では、専門外の人たちが超電導応用機器を取り扱うことになる。これら機器は、取扱に技術を要さず安全性の高い構造、材料でできていなければならない。特に、近い将来に実用化が予想される超電導利用分野である磁気浮上鉄道、超電導発電や、核融合炉用磁石やエネルギー貯蔵用コイルなど、いずれも大規模な装置になると予想され、蓄えられる電気エネルギー、磁場強度、電磁力なども巨大になる。

この厳しい温度環境下で使用に耐える材料として、種々の金属・無機・有機材料、および、それらの複合材料等と、各種材料分野から候補材としてあげている。これらの材料の使用、あるいは新しい材料を開発する上で、

それらの環境における機械的性質・熱的性質その他必要な特性を十分に把握することは重要である。この要求を満たしてそれらの一部は実用に供されているものもあるが、現存の材料からの選択や材料開発という観点から、低温という特殊な環境下における各種材料の機械的・熱的性質を多角的に調べるために計測手法の開発も必要なことである。

上で述べたように、低温工学は低い温度一般に関する色々な分野の応用的科学技術の複合体にほかならないが、近年の低温工学においては、120 K以下の温度領域を対象としている場合が多い。このような低温は物理的な研究の手段として開発されたが、液体水素、液体ヘリウムが種々の目的に多量に利用されるようになり、1950年前後から、液化の工業化が進むと、この分野は急速に発展した。

対象となる温度が下がるに従って、マーケットからニーズが発生する場数が減少し、技術革新から生まれる場合が増えてくる。液化技術、超電導現象の発見と超電導材料の開発、高温超電導体の発見とその線材の開発というような技術革新には、必ず新しい価値が生まれるわけで、これが基となり新しいマーケットの開拓あるいは出現が期待される。

これまで、超電導分野における応用機器として、超電導マグネット・磁気浮上・電磁流体発電（MHD 発電）・核融合炉・超電導エネルギー貯蔵など大規模システムにおいては、産・官・学でいうと、官主導型で多くの超電導技術が開発され発展してきた。

一方、民主導型としては、クライオポンプ・冷凍機・超電導核磁気共鳴（NMR）・磁気共鳴画像診断装置（MRI）などが代表される。産業側からすれば、このようなフリーマーケットにおいては、高価な商品であるが利用効果に適した製造コストで物作りすること、さらには家電製品なみの品質の信頼性を維持向上させる技術をも含ませた商品開発が要求されること

MHD : Magneto-Hydro-Dynamic generation

NMR : Nuclear Magnetic Resonance

MRI : Magnetic Resonance Imaging

はいうまでもない。*

2 産業別需要予測

2.1 エネルギー産業

2.1.1 エネルギー需要

現代社会は電力なしでは機能しないといえる。資源エネルギー庁企画調査課が平成11年10月発表した。平成10年度（1998年）エネルギー需給実績（速報）によれば、最終エネルギー消費（表 1-a 参照）は、15,156PJ（PJ=10¹⁵J）と対前年度比は1.1%減少した。これを部門別で見ると、産業部門では景気の停滞などにより3%の大幅な減少があったが、民生部門では全体ではエネルギー消費は0.3%の微増、民生部門の家庭の区分では全体では1.9%の減少であるが電力消費は増加している（即ち、石油製品・都市ガス等が減少した）。民生部門の業務の区分では3%増と顕著な伸びを示している。運輸部門は自動車の保有台数の増加などにより1.1%の伸びを示している。平成10年度全体ではエネルギー消費量は減少したものの、長期で見れば確実に増加傾向にある。尚、一次エネルギー供給（表 1-b 参照）は、22,811PJと対前年度比2.5%の減少であった。原油換算量にすると1996年度で最終エネルギー消費3.93億kl、一次エネルギー供給で5.97億klである。ちなみに我が国の石油備蓄の現状は、資源エネルギー庁石油部備蓄室の平成11年10月の発表によると、平成11年8月末現在の石油備蓄は、民間で83日分4,630万kl（製品換算）、国家備蓄で85日分4,750万kl（製品換算：原油で5,000万kl）、合計168日分9,380万kl（製品換算）である。

エネルギー消費について世界ではどうかというと、年々伸びており、1993

* Shoji Tanaka, "A Way to Commercialization of High-Tc Superconductors", Proceedings of the 16th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference, Editors T. Haruyama etc., Elsevier Science, Part 1, 3-11 (1997)

平成11年10月15日
資源エネルギー庁
企画調査課

表1-a 最終エネルギー消費の推移
(単位：PJ)

年度	73	79	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
一次エネルギー供給	16,133	17,210	19,328 (3.7)	20,357 (5.3)	20,552 (1.0)	20,963 (2.0)	21,213 (1.2)	22,353 (5.4)	22,768 (1.9)	23,118 (1.5)	23,389 (1.2)	22,811 (-2.5)
構成												
石油	77.4	71.5	57.9	58.3	56.7	58.2	56.6	57.4	55.8	55.2	53.6	52.4
石炭	15.5	13.8	17.3	16.6	16.9	16.1	16.1	16.4	16.5	16.4	16.9	16.4
天然ガス	1.5	5.2	10.0	10.1	10.6	10.6	10.7	10.8	10.8	11.4	11.6	12.3
原子力	0.6	3.9	8.9	9.4	9.8	10.0	11.1	11.3	12.0	12.3	12.9	13.7
水力	4.1	4.6	4.6	4.2	4.6	3.8	4.3	2.9	3.5	3.3	3.7	3.9
地熱	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2
新エネルギー等	0.9	1.0	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1

(注) ()内は対前年度比増減(%)

表1-b 一次エネルギー供給の推移
(単位：PJ)

年度	73	79	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
最終エネルギー消費	11,103	11,703	13,022 (3.5)	13,515 (3.8)	13,871 (2.6)	13,933 (0.4)	14,034 (0.7)	14,559 (3.7)	15,019 (3.2)	15,212 (1.3)	15,330 (0.7)	15,156 (-1.1)
産業	7,274	6,924	6,884 (2.8)	7,098 (3.1)	7,150 (0.7)	7,007 (-2.0)	7,037 (0.4)	7,285 (3.5)	7,446 (2.2)	7,543 (1.3)	7,569 (0.4)	7,341 (-3.0)
民生	2,011	2,448	3,158 (2.2)	3,304 (4.6)	3,465 (4.9)	3,599 (3.9)	3,640 (1.1)	3,757 (3.2)	3,946 (5.0)	3,948 (0.0)	3,984 (0.9)	3,997 (0.3)
家庭	988	1,336	1,760 (2.1)	1,796 (2.1)	1,837 (2.3)	1,923 (4.7)	2,005 (4.3)	2,009 (0.2)	2,144 (6.7)	2,143 (0.0)	2,141 (-0.1)	2,100 (-1.9)
業務	1,023	1,112	1,398 (2.4)	1,507 (7.8)	1,628 (8.0)	1,676 (2.9)	1,634 (-2.5)	1,749 (7.0)	1,802 (3.1)	1,805 (0.2)	1,842 (2.0)	1,897 (3.0)
運輸	1,818	2,331	2,980 (6.8)	3,114 (4.5)	3,256 (4.6)	3,327 (2.2)	3,358 (0.9)	3,516 (4.7)	3,627 (3.1)	3,722 (2.6)	3,777 (1.5)	3,818 (1.1)

(注1) ()内は対前年度比増減(%) (注2) 産業部門には非エネルギー向け消費を含む。

年の実績で石油に換算して約81億トンであり、1971年に比べて約1.6倍になっている。国際エネルギー機関の (IEA) の見通し (1990年6月) によれば、1993年から2010年までの世界全体のエネルギー消費は約1.5倍に (OECD 諸国では約1.3倍、日本を除くアジア地域では約2.2倍) となると予測している。

2.1.2 超電導発電機および超電導エネルギー貯蔵

前項で述べたように今後の電力需要は、年々伸び、2030年頃には全発電設備容量は2億5,000万kW～3億5,000万kW程度になると予測されている。社会環境が高度化するに従って、利便性の良い電力の需要が増大するのは確実で、省資源、省エネルギーを伴う高効率化だけでなく、地球温暖化防止のためのガス排出抑制による環境負荷低減も要求される。そういった中で超電導発電技術は、発電の高効率化やシステムの安定化向上に寄与するものとして期待されている。これらは新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けた超電導発電関連機器・材料技術研究組合 (Super-GM) ならびに(株)テクノバが研究開発に取り組んで行われている。これまでに、世界で初めて7万kWモデル機の運転に成功し、さらに、20万kW級の発電機の実現の可能性も示唆している。

電力需要の伸びに伴って、これに対応する余剰の電力貯蔵設備容量を確保するには、揚水式水力発電所だけに依存することは困難であり、この揚水発電に代わるエネルギー貯蔵のシステムとして、海水揚水、電力貯蔵用蓄電池、電力貯蔵用超電導フライホイール、圧縮空気貯蔵ガスタービン、超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) 等に関する技術開発が行われており、近い将来に機能するようになると考えられる。

とりわけ超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) は、極めて低い温度で電気抵抗がゼロになるという超電導の特長を生かして、電気の状態エネルギー

IEA : International Energy Agency

SMES : Superconducting Magnetic Energy Storage

一を蓄えることが出来るので貯蔵効率が90%近く得られこと、エネルギーの充放電速度が速いこと、有効電力と無効電力とを独立に制御できるなどの特長を持つ。負荷標準化、負荷変動補償、周波数変動補償、停電補償、瞬時電圧低下補償など、電力系統の様々な問題に対して適応できるものとして期待されている。現在、通産省工業技術院などが中心となって開発が進められている。

また、超電導フライホイールは、1日の電力需要を平準化（日負荷平準化）対策の一つとして開発されている。これは超電導磁気軸受けを使用してフライホイールを浮上させ、深夜の余剰電力をフライホイールの回転エネルギーとして貯蔵するもので、日中の電力消費のピーク時に電気エネルギーとして取り出すものである。

2.2 医療産業・エレクトロニクス産業

MRIは、放射線やX線のように人体の健康な組織を侵すことなく、体内の異常部位の位置や性質を画像技術を駆使して確定する。MRIから得られた画像解析により、疾患と損傷の診断を適格に行い、調査手術の必要性を少なくした。そういったことにより1980年代初期の出現以来、8000台以上が世界各地の医療施設に設置され、現在の超電導産業の一角を担っている。また、SQUIDと呼ばれる磁気センサーも微小磁力を感度よく捉えることから、心臓や脳が放射する極微小の磁気信号を検出するために使われるようになってきた。この超電導センサーもMRI同様、医療産業への貢献が期待されている。

現在の高度成長を支えているエレクトロニクス産業に通信産業がある。移动通信や衛星通信など軽薄短小に代表される装置・システムとして小型化が進んでいるが、これらの構成部品の効率は、電力損失に大きく左右されるようになってきた。これらの問題は超電導技術を融合することにより

低電力消費でかつ高速，低ノイズで機器を機能させることが期待される。

2.3 輸送産業

超電導を利用した磁気浮上列車 (MAGLEV)⁺は現存の輸送に取って代わる高速手段であり，超電導マグネットが重要な役割を担っている。現在，鉄道総合技術研究所により，山梨県の実験線で走行テストが行われており，1997年 (平成9年) 4月3日の走行試験開始以降，3両編成車両を用いて，同年12月12日に有人で時速531km，また，同24日には無人で時速550kmの世界速度記録を達成した。その後，5両編成を組成し，1999年 (平成11年) 3月18日には無人で時速548km，同年4月14日には3両編成の記録を上回る時速552kmを有人で達成した。

超電導技術は水上輸送にも影響をあたえだそうとしている。船体につけた超電導磁石により海水に磁場を発生させ，磁場に直交する電流を発生させることにより，フレミングの左手の法則により磁場と電流にそれぞれ直交する方向に推進力を得るものである。平成4年6月，超電導電磁推進船「ヤマト1号」が世界で始めて洋上航行に成功した。これにより船舶のデザインが大幅に変えることができ，日本各地の狭く複雑な湾岸において，大きな船でも容易に操作できるようになるであろう。しかしながら，その後は宇宙ロケットと同様，推進のための機材重量と価格の点で問題があり，実用化に向けた開発は行われていないようである。

3 超電導のマーケット予測

日・米・欧を中心に，1992年から毎年1回，国際超電導産業サミット (ISIS)⁺が世界各地で開催されている。第1回 ISIS は米国のワシントン

MAGLEV : Superconducting MAGnetically LEVitated vehicle

⁺ : JR 鉄道総研ホームページ :

<http://www.rtri.or.jp/rd/maglev/html/maglev-frame-J.html>

DCにおいて、米国のCSAC*、日本のISTEC**とヨーロッパのCONECTUS***のグループによって召集された。ISISの目的は、超電導分野における産業界、政府、大学の間の国際協力と公開討論を促進することにある。

第1回 ISIS では、高温超電導体の商業化は、21世紀初頭には実現し、今日の規模を越えて超電導製品の追加的市場が浮上して来るであろう事を考慮すると、高温超電導体応用の市場は、21世紀の初めの10年間に着実に成長過程をたどると予測した。第2回 ISIS は1993年5月、日本の箱根で開催され、中心課題は「超電導に関する地球的規模の市場予測」であった。表2に世界的規模の超電導の市場予測を示す。その結果は、図1のように表されており、産業にとって極めて明るい未来があることを示している。当時の地球規模の超電導市場は、15億ドル(1650億円)であり、将来、2000年には80~120億ドル(8800億円~1兆3200億円)、2010年には600~900億ドル(6兆6000億円~9兆9000億円)、2020年には1500~2000億ドル(16兆5000億円~22兆円)の市場に成長すると予測された。(1ドル110円換算) 主要な地球的規模のビジネスとしての超電導産業の潜在的な能力は確かなものであるとし、世界中の継続的で増大している民間投資や政府の支援が、

* : ISIS: International Superconducting Industry Summit

* : CSAC: Council on Superconductivity for American Competitiveness

** : ISTEC: International Superconductivity Technology Center

ISTEC ホームページ <http://www.istec.or.jp/ISTEC-homepage/ACTIVITY.html>

なお、エネルギー産業の中で LNG (Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス) がある。これは低温技術によって約 -160°C に冷却し、液化したものである。燃焼時に炭酸ガス(CO_2)の発生量が少なく、硫黄酸化物(SO_x)をほとんど含まないため、環境にあたえる影響が少なく、また、中東への依存度が低いために供給の安定性が高いなどの優位性から、1995年度の国内の一次エネルギーの総供給量に占める割合は11%に達している。しかし、将来を見越すと、可採年数が約60年であることと、超電導に比べて市場への拡張性が期待薄であることから、市場予測からは省いた。

*** : CONECTUS: Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity

市場規模の推移

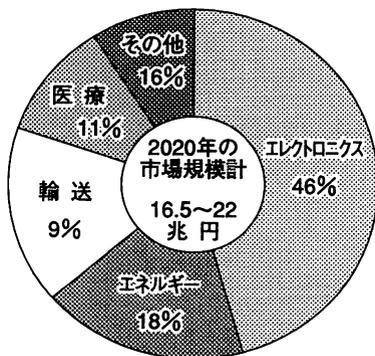
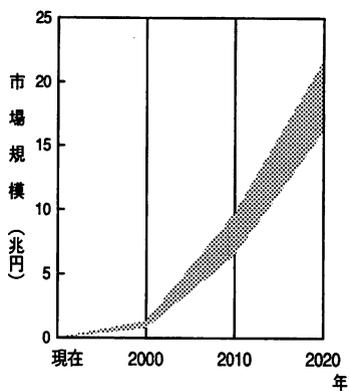


図 1 2020年の超電導産業の市場予測
(第 2 回 ISIS : 1993年における市場予測資料)

表2 世界的規模の超電導市場予測
 (第2回 ISIS: 1993年における市場予測資料)

(1ドル110円で換算)

		市場予測 (世界全体)				
		現在	2000	2010	2020	分野別製品例
合計市場規模 (億円)		1,650	8,800～ 13,200	166,000～ 99,000	165,000～ 220,000	
分野別 市場 規模の 割合	エレクトロニクス	—	23%	32%	46%	コンピュータ マイクロ波素子等
	エネルギー	—	15%	16%	18%	SMES 発電機等
	輸送	—	9%	6%	9%	磁気浮上列車 電磁推進船 等
	医療	—	30%	24%	11%	医療用 SQUID システム MRI, MRS
	その他	—	23%	22%	16%	磁石 磁気シールド 等
	合計	—	100%	100%	100%	

超電導の将来ビジョンを支えるために必要であるとした。また、超電導技術の商業化を一層加速するために、将来的に共同プロジェクトを立ち上げ基礎もしくは可能性を与える技術の開発を推進していくことを掲げた。

超電導の市場予測については、1996年5月日本の山梨県で開催された第5回の ISIS において見直しがあった。表3に各地域における超電導市場予測、また、図2に超電導市場予測図を示す。その時の調査では、超電導市場を、エレクトロニクス、エネルギー、輸送、医療、プロセス産業、研究とその他の6分野に分類して実施している。1993年当時予測されていなかったプロセス産業が超電導応用市場に出現したことが注目された。また、この ISIS の中で、21世紀には開発途上国の中にも超電導製品のマーケットが出現することが期待された。

続く第6回の ISIS (1997年9月) はヨーロッパのイタリアで開催された

表 3 各地域における市場予測
 (第 5 回 ISIS : 1995年における市場予測資料)
 (兆円) 1 ドル=¥100

	1995	2000	2010	2020
米国 (CSAC)		.46	1.8	6.2
欧州 (CONECTUS)		.1	.3	1.8
日本 (ISTEC)		.2	1.6	4.2
合計	.17*	.76	3.7	12.2

*この数字は MRI (磁気共鳴画像装置) 及び他のマグネットの売り上げを示す。

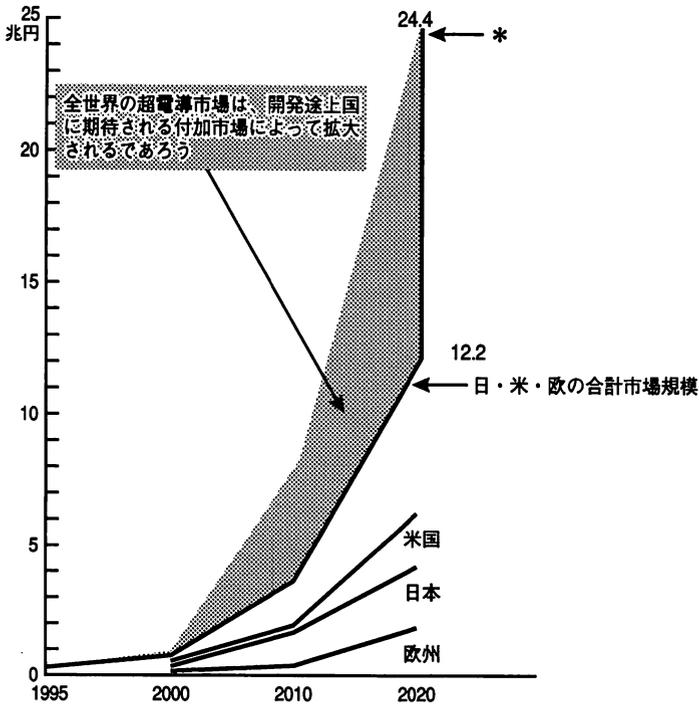


図 2 超電導市場予測 (単位:兆円) (\$/¥交換レート: \$ = ¥100)
 (第 5 回 ISIS : 1995年における市場予測資料)

*この予測には世銀統計から推測して日本, 米国, 欧州以外の国々の市場分として, 予測 100%の市場が加算されている (網掛けの部分)。

表4 ISIS 構成団体

超電導利用のための欧州企業連合 ヨーロッパ(CONECTUS)	
Accel Instruments GmbH	Haldor Topsoe A/S
Ansaldo GIE	Hoechst AG
BICC Cable Ltd.	KFK GmbH
Cryoelectra GmbH	Merck Ltd. Noell GmbH
Daimler-Benz AG	Oxford Instruments plc
Ericsson Components AB	Pruessag AG Technik Forschung und Entwicklung
Europa Metalli-LME	Siemens AG
Fit mbH	Thomson-CSF
GEC Alstom Electromechanique SA	

超電導関連米国競争力評議会 米国(CSAC)	
ABB, Inc.	Intermagnetics General Corporation
Air Products & Chemicals, Inc.	Lockheed Martin
American Superconductor Corporation	Los Alamos National Laboratory
Babcock & Wilcox	Oak Ridge National Laboratory
DuPont	Oxford Superconducting Technology
Electric Power Research Institute	Reliance Electric Company
Everson Electric Company	Superconductive Components, Inc.
H.C. Wainwright & Company, Inc.	Texas Center for Superconductivity
HYPRES, Inc.	TRW Space & Defense
Illinois Superconductor Corporation	Westinghouse Electric Corporation
INCO Limited	

国際超電導産業技術研究センター 日本(ISTEC)		
勸電力中央研究所	川崎重工業株	勸鉄道総合技術研究所
中部電力株	川崎製鉄株	三洋電機株
中国電力株	備神戸製鋼所	シャープ株
デュボン株	京セラ株	四国電力株
電源開発株	九州電力株	昭和電線電纜株
備フジクラ	松下電器産業株	住友電気工業株
富士通株	三菱電線工業株	住友金属工業株
古河電機工業株	三菱電機株	東北電力株
日立電線株	三菱重工業株	東京電力株
備日立製作所	三菱マテリアル株	東京ガス株
北海道電力株	日本電気株	備東芝
北陸電力株	日本ガイシ株	トヨタ自動車株
石川島播磨重工業株	日本特殊陶業株	その他普通賛助会員62社
備ジャパンエナジー	新日本製鐵株	
関西電力株	沖電気工業株	

が、主要テーマとして「超電導産業の市場予測」が再びあげられた。超電導全産業の合計は2020年で最大24兆円（1 \$ = 100円）であると発表した。また、表4に示されるISIS構成団体の各企業からのアンケート調査結果から、1996年度の超電導産業の合計は3B\$（1B\$ = 0.1兆円）と見込まれた。主要産業機器としては超電導式磁気共鳴画像診断装置(MRI)、核磁気共鳴分装置(NMR)が2.2B\$, 加速器, ITERなどの核融合研究施設0.6B\$, 電動機, 磁気浮上列車(MAGLEV), 磁気分離装置などで、0.2B\$, エレクトロニクス関連で、0.03B\$である。

あとがき

ISISによる超電導の市場予測は今後も続けられていくだろうが、予測は世界の経済的状況に大きく左右されるものである。日本の新幹線の車両および運行システムは性能・信頼性ともに優れ、世界的にも群を抜いている。これと同様、超電導線材の作製技術も世界でもトップレベルで信頼性も高い。さらに、将来のエースになりうる高温超電導体の線材作製技術では世界を大きくリードしている。宇宙開発・自然環境保全・省エネルギー化など、益々高度な技術が要求される近未来21世紀において、超電導技術あるいは性能という特別に高い付加価値のある製品群が逆に世界経済を大きく変えていく原動力になることを期待している。