超電導トロイダル・コイル開発の国際協力 “LCT 計画”の展開と結果

島 本 進

日本原子力研究所 茨城県那珂郡那珂町

(1989年5月10日受理)

Evolution and Final Results; International Collaboration of
Superconducting Toroidal Coil Development

Susumu SHIMAMOTO

Japan Atomic Energy Research Institute,
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken 311-01, Japan

(Received May 10, 1989)

Synopsis :

The large hardware international collaboration for fusion power has been carried out and successfully completed. The collaboration has been named as Large Coil Task (LCT) for superconducting toroidal coil under auspices of the International Energy Agency. This paper describes the overview of the task and the experimental results. A superconducting coil system is indispensable for fusion power generation in order to confine and control plasma. However, it is technically impossible to construct such large coil system with one step. The evaluation on conductor types and materials, and the scaling-up are requested to construct a practical reactor. In order to have efficient developments, an international collaboration was undertaken in 1977. The participants are the United States, EURATOM (represented by West Germany), Switzerland and Japan, of which US acted as the operating agent. The major part of the project has been devoted to six coils (5.5 m height, 40 ton/coil) fabrication and facility (helium refrigerator etc.) construction. As the final stage of the project, the experiment have been continuously performed from January 1986 until September 1987 in the United States. All the six coils, which brought from the participants, satisfied the original target, 8 T field generation. In the extended condition, finally 9 T was simultaneously obtained with all the coils.

1. はじめに

標記の“LCT 計画”は、我が国にとって初めてのタイプの国際協力として開始され、10年を越す歳月を経て本年1月をもって成功裡に協力を閉じた。本計画を開始する当時の状況については、故安河内先生が雑誌『自然』に「大型コイル計画」¹⁾として、興味深い文を綴っておられる。安河内先生の文を改めて開いて見ると、10年以上も前とは思えない新鮮さと、先生の優れた洞察力を感じる。その中には次の文章が見

られる。「こうした国際協力は牧歌的なものでなく、ある種の闘争なのである。」この具体的な様子は後の節に記させていただくことにする。

本計画の技術的内容^{2,3)}あるいは実験結果⁴⁾については、本誌を始め他の雑誌に一部を紹介した。その後、協力に携わった4ヶ国で本計画の国際マネジメント、各コイルの詳細なパラメータ、米国が準備した実験装置、定格実験から拡張実験にいたるすべてのデータを収録した230頁の英文報告書⁵⁾を出版した。詳細の内容はこれらに譲るとして、ここでは本協会の方々

Table 1 The six LCT coils design parameters.

	← U. S. A. →			EURATOM	Switzerland	Japan
Organization	← ORNL →			KfK	PSI	JAERI
Fabrication	GE	GD	WH	Siemens	ABB	Hitachi
Superconductor	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb ₃ Sn	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
Winding	pancake	layer	pancake	pancake	pancake	pancake
Cooling	pool	pool	forced-flow	forced-flow	forced-flow	pool
Structural material	SS 316 LN	SS 304 LN	Al alloy	SS 316 LN	SS 316 LN	SS 304 LN
Current (A)	10,500	10,200	17,800	11,400	13,000	10,220

に長期にわたり、かつ巨大な国際プロジェクトの経緯、結果および終結について限られた頁数で解説を試みる。

2. 6個のコイルの内容と実験項目

核融合臨界プラズマの達成を目標とする、TFTR (米)、JET (ユーラトム)、JT-60 (日)……いずれも常電導コイルを使用……の建設が決定された後 (1976年頃) ただちに次の段階である核融合実験炉のための R & D が検討された。この実験炉には超電導コイルが不可欠であることは周知であるが、どのような構造・材料が適しているかを段階を経て最適化するには多大な費用を要する。この費用を軽減するために OECD の下にある国際エネルギー機関 (IEA) が中心となって国際協力で、“Large Coil Task (LCT)” を推進しようということになった。

この作業の内容は上に記した主旨を良く生かし、全く未踏の領域であるトカマク装置用 8 T 超電導トロイダル・コイルを米国が 3 個、ユーラトム (西独が代表)、スイス、日本がそれぞれ 1 個ずつ、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) に外寸法を同じくして、内容は独自の設計のものを持ち寄ってその性能を比較するというものである。1 つのコイルの高さは約 5.5 m、幅約 3.5 m で 40 t の重さである。協定は、1977 年秋に米国とユーラトムとの間で調印され、これから約半年後に日本とスイスが追加調印した。

協定調印後、それぞれ独自に提案されたコイルの特徴を簡単にまとめると Table 1 のようになる。幹事国である米国は直径 11 m、深さ 10 m の大きな真空容器、約 1.5 kW の He 冷凍機、電源・保護装置、コンピュータを用いたデータを収集装置等の設備を整えることとなった。この協力において米国は設備の提供と

コイルの製作の両者を行う幹事国という点から、他の参加国より一段上の立場にある。他方、ユーラトム、スイス、日本の 3 国はコイル持込みという点で全く同等の立場にある。しかし、コイルの実験作業では幹事国はそれぞれの国の主張を受入れ、それにしたがって設備を運転する。つまり、実験作業において 4 ヶ国が等しい立場になる。各国間で資金の移動もなく、人員派遣も参加国の責任において行った。従来の国際協力において、我が国は従属的であったのに対し、本協力では一歩前進した形態を取ったのが特徴である。

Fig. 1 The Japanese LCT coil being installed at Oak Ridge National Laboratory in January 1983.

Fig. 2 The six LCT coils installed in the vacuum tank: October 1985 at Oak Ridge National Laboratory.

6 個のコイルの中、3 個が浸漬冷凍、3 個が強制冷凍方式と、ちょうど半分ずつに自ずと分れた。それぞれの導体および巻枠の構造等の詳細については最終の報告⁵⁾を参照していただきたい。これら構造が異なるために製作工程が同一でなく、それぞれのコイルの完成した時期はそれぞれでんでんばらばらとなった。もっとも、工程遅れの他の原因として米国においては契約が精算方式 (Best Effort Contract) であったことも大きい。Fig. 1 に 1983 年 1 月に ORNL の装置に取りつけられた日本コイル、Fig. 2 に 1985 年 10 月、6 個のコイルが出揃って真空容器の蓋を閉める時の様子を示す。Table 2 は ORNL へのコイル搬入を含めて、“LCT 計画”の主な経緯を列記したものである。

米国の仕様書に記述してあった主たる実験項目を整理すると Table 3 になる。この表の Standard 1 と 2 は仕様上満足すべき条件であるのに対し、Alt A ~ C は工学的限界を試みる拡張実験である。実際の作業はこれらの項目以外に、予冷、各コイルの単体通電および計測系の調整、昇温等がある。予冷を開始したのは 1986 年 1 月 18 日であり昇温を終了し、真空容器を開始したのは 1987 年 10 月 9 日で、1 年半を越える期間 320 t の重量物 (6 個のコイルと支持構造物) が 4 K に保たれた。この間ヘリウム液化・冷凍機はそれ自身の内部故障により何度か停止したが、いったん冷えてかつ高真空中に保たれた重量物は数日間ではほとんど温度は上らなかった。

Table 2 Chronological events in LCT program.

Year/Month	Items
1977 Oct.	USA and EURATOM signed on the agreement.
1978 Apr.	JAERI signed on the agreement.
Sept.	Switzerland signed on the agreement.
1982 May	JAERI completed the domestic test.
Nov.	Arrival of the Japanese coil to ORNL.
1983 Jun.	Arrival of the US-GD coil to ORNL.
1984 Jan.	Stop of two coils cool down due to helium leak.
Feb.	Arrival of the Swiss coil to ORNL.
Apr.	KfK completed the domestic test of the EURATOM coil.
Sept.	Completion of the three coil test in ORNL.
Nov.	Arrival of the EURATOM coil to ORNL.
Dec.	Arrival of the US-GE coil to ORNL.
1985 Aug.	Arrival of the US-WH coil to ORNL.
1986 Jan.	Start of the six coils cool down.
Nov.	Achievement of simultaneous 8 T in the six coils.
1987 Sept.	Achievement of simultaneous 9 T in the six coils.
Oct.	Opening of the vacuum tank.
1988 Sept.	Publication of the report.

Table 3 Experimental items on the LCT coil defined in the specification by Oak Ridge National Laboratory.

Title	Demonstration for fusion	Experimental contents
Standard 1	8 T Steady toroidal field	100% current in testing coil, 80 % current in other five coils. Half turn recovery test, nuclear heating simulation
Standard 2	Pulsed field effect	0.14 T/s pulsed field (up to 1s) application to testing coil in the similar condition to standard 1
Alt C	Current limitation	Try to charge up to 140% current in testing coil only
Alt A	Field limitation	Try to charge up to around 110% current in all the coils simultaneously
Alt B	One coil failure condition	Five coils in 100% current. Two extreme coils receive high bending moment

3. 国際協力作業の経緯

“LCT 計画”に参加することを表明すると、日本側に米国より LCT コイルの製作仕様書が手渡された。たびたび、ORNL を訪れてこの仕様について米国側と討論したが、この作業は内容の論理の整理に役立ち、米国側にとっても意義あるものであった。この仕様書を読むことにより、米国が大型の技術開発を行う際の手法を学び取ることができた。このことは、本国際協力を通じて学んだ大きなものの一つである。

このような国際協力において、それぞれの国によって契約手法および許認可制度が違うため、作業を同時に開始しても途中の過程が大きく異なってくる。定期会合において数々の交渉と調整が行われる際、単なる慣習の相異のみでなく、政策的立場からも事情が異なるので、各会合において合意に至らないまま先へ進んだことも多かった。相互理解および受容の難しさをここでも体験した。二、三の例をここに記す。

(1) 本協定には国内実験は全く記述されず、自主的に行うということであった。日本の国内実験は本計画中で最初のものであり、コイルおよびシステムの振舞にたいへんな興味が持たれた。つまり、米国とユーラトム（西独）から実験に参加したい意志表示があり、執行委員会で他の国内実験に相互に参加ということで合意された。

実施の段階になり、人員派遣協定文を作り、文中に知的情報（特許等）発生の折には原研が第一査定権を持つことを明記した。西独はこの文面でただちに合意した。しかし、米国は法律担当者が現れ「“LCT 計

画”においては米国は全てについて第一査定権がある。」と主張し、ついに平行線に終わった。或る人は、本協定に記されていない国内実験にまで、米国の星条旗を立てようとする行為は理解に苦しむと語っていた。

(2) 1984 年 1 月、2 個のコイル（日本、GD）で予備実験を行おうと予冷を開始したが、途中で GD コイルより He 漏れが生じた。この対策決定のため参加国が緊急会議を ORNL で開いた。この折、GD コイルを取りはずし、日本コイルのみによって実験を先に進めることが、設備側の問題点洗い出しの近道であることを多くの人々が理解していた。しかし、米国はこの会議において、GD コイルをあえて取り出さず、真空容器内に取り付けたままで修理することを、他国の意見に耳を貸さず決定した。この緊急会議を終えて帰国したその日に、筆者は現地より「GD コイルは作業性のため、真空容器から取り出した。」と電話を受けた。その上、予定していなかったスイス・コイルの取り付けも行おうということで、心は動転した。

(3) 5 個のコイルが出揃って半年を経過した 1985 年 5 月の定期会合においても、最後の米国の WH コイルの完成予定に目処が立たなかった。このため、この会合は紛糾し、時間切れで解散となった。一連の作業の中これまで米国の作業が当初より遅れるものが多かったので、ヨーロッパの 2 国および日本は、WH コイルの目処の立たぬ遅延が本計画の最終目的である実験に致命的影響を与える可能性を感じた。したがって、この 3 国は特別執行委員会をパリの IEA 本部で開くことを主張した。

他方、米国の態度は明確でなく、会合開催を認めたものの、米国の執行委員はパリには現れず、OECD 米国代表者が代理出席ということになった。この結果、議事録は大変厳しいものとなり、ORNL が暗に示していた期日に WH コイルをこの年 8 月に ORNL に搬入すべしという記述が入った。この後この約束は守られた時の関係者の喜びは大きく、かつ米国のこの尽力が高く評価された。

一刻も早く実験に入ろうと、全員が尽力したが種々の支障があり、6 個のコイルの予冷が始まったのは 1986 年 1 月であった。以来、1 年半の間実験が続けられ、1987 年 9 月に最後の項目である拡張実験を終えた。その 1 ヶ月後には昇温を終了し、日本コイルの取り出し作業に掛った。これら一連の作業も単純ではなく、紛糾する会議を一つ一つ乗り越えて進められた。各国のチームは、報告書執筆のためにデータを持ち、以後三々五々と帰国して行った。日本コイルは 1988 年 2 月末、無事に原研那珂研に帰還した。実に 5 年を超える旅と過酷な実験をくぐりぬけて来たが、何等傷んだ所は見られなかった。

1988 年 9 月には共同執筆の英文報告書が出版された。これに基づいて、1989 年 1 月 24 日パリの IEA 本部で LCT シンポジウムを開き、IEA の国際協力の中で最も成功したものの一つであることを全ての人が認知し、この協力作業を閉じた。

4. 一連の実験から得られた成果

4.1 予 冷

仕様書には、コイルが 120 時間の予冷に耐えること

Fig. 3 Cool down characteristics of the six LCT coils.

が条件となっていた。日本の国内実験では、日本コイルにほぼ 40 g/s のヘリウム流量供給によりこれを実証した^{6,7)}。

ORNL では 4 K まで冷やされる重量は 320 t である。1985 年 1 月 18 日より予冷を始め、2 月 13 日に WH コイルが（臨界温度の高い Nb₃Sn 使用）先に超電導になり、Nb-Ti を開いている他の 5 個は 2 月 19 日に同時に超電導状態になった。この間の 6 個のコイルの予冷特性を Fig. 3 に示す。異なる国の異なる企業が作った、多量の導体が同時に超電導状態になったことは、重要な技術的基盤が確立したことを示す瞬間であった。予冷仕様書以上の長時間を要したのは、高い熱応力为了避免するためコイル内の温度差を少なくし、供給ヘリウム流量を低減したことによる。

4.2 Standard 1

10 kA 組の導体を 7 km 使用し、その中に数十ヶ所も半田接続部がある LCT コイルが、4,000 t の向心力を受けつつ 8 T を発生しうるか否かは大きな挑戦であった。1986 年 11 月 6 日に 6 個のコイルが同時にこの条件を満たした時の各国の喜びは大変なものであった。

この状態において歪および変位測定、熱負荷測定、1/2 ターンの人為的常電導からの超電導への復帰、模擬核加熱量の安定限界の 4 項目の作業を行った。日本コイルについて代表的な結果⁸⁾を記すと次のようである。

導体の長手方向の歪量は大体 1,000 ppm であり、これを応力値に換算すると 150 MPa 程度である。これは加工硬化した銅の 0.2 % 耐力より十分下の値であり何等問題ない。巻線部と巻棒との間の変位は最大で数 100 μ m であり、その分布は電磁力分布と良く対応している。定格運転時の熱負荷は 75 W であり、6 個のコイルの中最少でありかつ設計値とも良い一致をしていた。人為的常電導からの復帰、模擬核加熱の両実験においても、日本コイルは当初の目標をすべて達成した。これらの定量的データはより厳しい条件の Standard 2 の項目において記述する。

各国のコイルは、加熱ヒータ、計測素子が必ずしも同一に取り付けられていないので上記の測定が行えないコイルもいくつかあった。また、スイス・コイルはその巻線部が電磁力により動いたため何度か転移を繰返して目標の 8 T を達成する⁹⁾ことができた。

4.3 Standard 2

この実験では、トロイダル磁界を所定の値にしてお

Fig. 4 Pulsed loss of the three LCTcoils due to simulated poloidal field.

き、0.14 T/s の磁界を1 s で立ち上げ、14 s 間保持し、次に1 s で減衰させるパルス運転を150 s 周期で10 回繰返すことにより、コイル本体の損失パワーを熱的に測定した。この測定値を Fig. 4 に示す。日本コイルの損失量は理論解析値と良く一致しており、この電磁解析技術が確立したことを認知した。

この実験では、先の Standard 1 での予備実験をふまえ、模擬核加熱を行っているところにパルス磁界を加え、その上1/2 ターン常電導転移を行う過酷な試みを行った。Fig. 5 は日本コイルのデータを示すもので、2 s 以下で超電導に復帰し、優れた安定性を示している。この結果が得られたのは日本コイルのみである。

4.4 拡張実験

Alt C：それぞれのコイルを単独に定格電流の140 %まで通電する試みにおいて得られた結果をまとめると Table 4 となる。ユーラトム・コイルのみがこの目標値を達成した。日本コイルは Table 3 に示されているようにあと2 %の手前で最大磁界部より常電導

Fig. 5 Superconducting stability test results on the Japanese LCT coil: toroidal field 8 T, nuclear heating simulation (576 W as a whole, 55 mW/cc at the heated part), half turn artificial normalcy), spontaneous recovery around 2 s.

転移した。この転移の1つの理由として、米国の仕様は4.2 K の He を供給すると記述してあったのに対し、実際の設備は4.4 K の He を供給していたことが掲げられる。

Alt A：この実験は定格を越える磁界に挑戦することが目的である。最終的なデータを Table 5 に示す。WH コイルはNb₃Snを用いているにもかかわらず、定格電流の56 %位から微少電圧を発生し、108 % 運転の折にはその熱損失は700 W¹⁰⁾にもおよんだ。ついにこのコイルから転移し、全コイルを放電して実験を閉じた。この時のコイルの蓄積エネルギーは944 MJ であり、その中104 MJ が4 K 部で消費された。

1976 年仕様書が書かれた折のNb-Ti 材では8 T の発生すら危うかったが、本計画推進の努力により9 T の壁を越えることができたのは立派な成果といえよう。

Alt B：コイルを破損する可能性は本実験において最も高い。したがって、仕様書にある値まで十分な実験を行ったのは日本コイル¹¹⁾とユーラトム・コイルのみであった。Fig. 6 は日本コイルが、それぞれ GD

Table 4 Attained current and field values in each coil in the testing of Alt. C.

	Japan	Swiss	EURATOM	US-WH	US-GE	US-GD
Current (% to rated value)	14,061A (138%)	15,600A (120%)	15,949A (140%)	23,134A (131%)	14,580A (139%)	12,200A (120%)
Field	8.8T	7.6T	9.0T	8.1T	8.9T	7.7T
Temperature	4.4K	3.8K	3.8K	3.8K	4.4K	4.4K
Performance	Quench	Stopped at 120%	No transition	Quench	Transition	Quench

Table 5 Attained current and field value simultaneously in the six coil in the testing of Alt. A.

	Japan	Swiss	EURATOM	US-WH	US-GE	US-GD
Current (% to rated value)	10,802 A (106%)	12,870 A (99%)	12,084 A (106%)	19,181 A (108%)	11,130 A (106%)	9,996 A (98%)
Field	9.1 T	9.1 T	9.2 T	9.0 T	9.2 T	9.0 T
Temperature	4.4 K	3.8 K	3.8 K	3.8 K	4.4 K	4.4 K
Performance	No transition	No transition	No transition	Quench	No transition	N transition

Fig. 6 Strain values (ppm) at the central plane in the Japanese LCT coil when two cases of Alt. B testing were performed.

コイル，スイス・コイル側に吸引された場合のコイル赤道面内の水平方向の歪量 (ppm) である。この最大歪に対応する応力値は約 600 MPa であり，設計計算値との良い対応がみられる。

Fig. 7 は日本コイルの主たる実験での動作特性を示すものであり，4.4 K で運転された条件で納得のいく結果を示している。

5. 核融合実験炉トロイダル・コイルへの道

現在，国際協力等により実験炉の概念設計が行われており（例えば国際熱核融合炉 “ITER”），そのトロイダル・コイルの蓄積エネルギーは 40 GJ にもおよ

Fig. 7 Performance of the Japanese LCT coil in superconducting current and field chart.

ぶことが示されている。それぞれのコイルの向心力は LCT コイルが受けた値の一桁以上大きく，同時に最大磁界 12 T を満足しなければならない。

LCT 計画そのものが当初の技術レベルからみて大きな跳躍であった。しかし，LCT 計画よりも 40 倍の蓄積エネルギーをもつ実験炉トロイダル・コイルの実現へはさらに長い距離の道があると思われる。LCT 計画の経験から実験炉トロイダル・コイルへ向けての指針をいくつかの代表的項目を取り出して，Table 6 に示す。これらの項目を慎重に検討すると，実験炉に向けて一足飛びの作業は危険であり，しかるべきステップを作りつつ進むべきであると思われる。ただし，そのステップはそれなりのシステムと跳躍の幅を必要とする。余りに保守的であっては不経済であり，かつ無意味なものとなる。LCT 計画は，このようなある種の挑戦に対してその途上いくつかの困難に遭遇して

Table 6 Prospects of superconducting toroidal coil technology in Fusion Experimental Reactor from view point of LCT experiences.

	Item	LCT	Fusion Exp. React.
Cooling	forced/pool	matured pool technique	forced is better for larger system
	stability in forced	better in bundle than in monolith	further study
	flow balance in forced	no unbalance	enough experience
	pressure increase in forced	overestimated	further study
Structure	transmission of force	lower than expected	further study
	out of plane force	torque ring method	shear panel method
	centering force	bucking post method	wedge or bucking post method
	one coil fault	peak stress around 650 MPa	too high peak stress
Electricity	current	up to 18 kA	over 30 kA
	pulsed loss	excellent agreement with calculation	barrier in strand may be necessary
	protection	simultaneous dump	simultaneous dump
Instrumentation	insulation	insulation of instrumentation is important	insulation should be perfect
	sensors	damaged about 10%	no sensors in winding
	detection of normalcy	compensation of inductance	new technique is required

も、その折々の適切な判断と努力を持てれば必ず目標を達成できることを体験させてくれた。

本文中においては、コイルの結果にのみしか触れなかったが、周辺設備の技術の経験もコイルと同様あるいはそれ以上に蓄積できた。これらの具体的項目はHe冷凍系・電源系・計測系・コイル周辺（真空容器内）である。真空容器外での故障等は、運転を中止しただちに修理に入れるが、真空容器内での異常事態は目視もできず開放して実態を知ることになる。実際、LCTコイル周辺では電磁力によりボルトの破損が生じていたことを容器開放後に発生するという事実⁴⁾があった。幸い、事故に到る前に実験を終了していた。実験炉実現に当っては、単に前衛的なところへののみ意を集中すべきでなく周辺技術にも同等の力を注ぐ必要があることをこの事実は物語っている。

6. おわりに

LCTのように大きな超電導コイルがその方式を異にして同一条件で、超電導特性等を実際に評価したのは初めてである。これまで記した技術的データを総合

的に見ると以下のようなことがいえる。

(1) 浸漬冷凍コイルと強制冷凍コイルと比較してみると、前者は所定の性能をほとんど満たした。後者のコイルの中には性能を十分に満たせなかったものがある。その理由は、基本設計あるいは品質管理にある。つまり、LCT規模において、浸漬冷凍方式の技術は成熟したが、強制冷凍方式において未熟な点が残っていることを物語っている。

(2) 日本のコイルは、すべてにわたり設計性能を十分に発揮した。従来、国内においても核融合炉用コイル・システムの設計が机上で行われていたが、LCTの体験により全体の設計像が大幅に具体的なものとなった。これは本計画の有意義な成果の一つである。

(3) 大型技術の開発では、その発想・設計のみが優れていても製作上の品質管理がそれを上回るものでないと、実質的成果が得られないことが明確になった。

(4) 建設に長い年月を要する大型装置の作業では、その間に多くの分野での技術的進展があることを見越し、完成の折に陳腐化したものにならないように仕様等を設定すべきである。LCTの仕様書はこの点優れ

たものである。

(5) 利害得失を伴う技術開発においても、協力の論理が整然としている限り、国際協力による効率的作業が可能であることを“LCT 計画”は実証した。

本計画を通じオークリッジにおいて“一心同体”で作業を進めることによって、多国にわたる専門家と非常に深い関係を持つことができた。先端技術開発も一国の意志決定による独立路線というものがなくなりつつある現在、非常に貴重な経験をしたのは、相互に有意義であったと思う。

“LCT 計画”の進行中、始祖であられた安河内先生、Heinz 先生が他界された。2 人の先生方は 6 個のコイルが完成するのも御覧になれなかったことはいかにも残念に思う。

“LCT 計画”を推進するに当っては、関係各省庁の方々、日本原子力研究所の歴代の上司および事務レベルの方々、設計会議および製作を担当した企業の方々に、本文を通じて深く謝意を表する。オークリッジでの実験においては、原研職員のみならず国内の企業の研究員も加わり、他国の研究員と一致協力して活躍

した日本チームは執行委員会においても名声を残したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 安河内 昂：自然 8月号 (1978) 26
- 2) 島本 進，安河内 昂：低温工学 **19** (1984) 73
- 3) 島本 進：日本原子力学会誌 **25** (1983) 157
- 4) 島本 進：奥野 清：日本原子力学会誌 **30** (1988) 488
- 5) Special Issue on the IEA Large Coil Task, Fusion Engineering and Design **7** (1988, Sept.)
- 6) 多田栄介他：低温工学 **19** (1984) 153
- 7) S. Shimamoto et al: IEEE Trans. Magnet-ics **MAG-19** (1983) 851
- 8) K. Okuno et al: IEEE Trans. Magnet-ics **MAG-23** (1987) 1683
- 9) M. S. Lubell et al: IEEE Trans. Magnet-ics **MAG-24** (1988) 761
- 10) L. Dresner et al: IEEE Trans. Magnet-ics **MAG-24** (1988) 779
- 11) K. Okuno et al: IEEE Trans. Magnet-ics **MAG-24** (1988) 767