U.D.C: [621. 318. 3:538. 945]:621. 039. 637

核融合用LCT超電導マグネットの開発 Development of LCT Superconducting Magnets for Fusion Power

将来の核融合炉に必要不可欠な大型超電導トロイダル磁場コイルの開発を目 的に, IEA(国際エネルギー機関)を中心に開始から約10年の歳月にわたって推進 されてきた「LCT: Large Coil Task(大型コイル事業)」は,数多くの貴重な 実験データと実り多い国際共同研究の成果を挙げて,1987年9月成功裏に完了 した。

この計画に参加した6個のコイルのうちの一つである日本のLCTコイルは, 要求されたすべての性能仕様を満足するとともに,拡張実験でも優秀なコイル 性能を持つことを実証した。

本稿では、LCT計画の目的と概要を振り返り、本計画の最大のハイライトで あるORNL(米国オークリッジ国立研究所)のトーラス配置での総合励磁実験の 結果について、日本のLCTコイルを中心に述べる。

島本 進*	Susumu Shimamoto
奥野 清**	Kiyoshi Okuno
飯田文雄***	Fumio Iida
多田直文****	Naofumi Tada
斎藤龍生****	Ryûsei Saitô

人類に無限のエネルギーの供給を約束する核融合炉の実現 には、相互に関連する数多くの先端技術を必要とする。中で もプラズマを閉じ込めるための磁場を発生するコイルの超電 導化は,現実的な消費電力および現実的設備という観点から絶 対不可欠の課題である。そこで,核融合実験炉を目指した大 型超電導コイル開発の国際協力として、1976年にIEA(国際エ ネルギー機関)からLCT(Large Coil Task)計画^{1),2)}が提案さ れた。その主旨は、一国でそのような巨大コイルの開発を進め るには技術的,経済的に負担が大きすぎるので,多国間で分担 して核融合実験炉に用いられる予定の超電導コイルの約一の 寸法のコイルを作り,大型コイルの製作および運転技術を確立 することであった。本計画には米国(DOE/ORNL: Department of Energy/Oak Ridge National Laboratory), 日本 (日本原子力研究所), ユーラトム(西ドイツ・KfK: Kernforschungszentrum Karlsruhe)およびスイス(PSI: Paul Scherrer Institute)が参加し、これまでに例のない大型のハー ドウェアを伴う多国間共同研究として1977年に作業が開始さ れた。LCTコイルの製作は各国の研究機関を通じ米国ではGD (General Dynamics), GE(General Electric), WH(Westinghouse)の3社、日本は日立製作所、ユーラトムは西ドイツの Siemens, スイスはABB(Asea Brown Boveri)の各社がそれ ぞれ1コイルずつ担当した。これら6個のLCTコイルは幹事

に配置され,所定のトロイダル磁界を発生させると同時に各 コイルの諸性能を実証する実験が行われた。日立製作所は日 本原子力研究所の指導のもとに、詳細なコイルコンポーネン トの実証試験とコイル製作設計³⁾を実施した後、JA(Japan)-LCTコイルを1981年10月に完成した。本コイルは直ちに日本 原子力研究所の用意したLCT国内試験装置に据え付けられ, 低温フィードスルーからのヘリウムガス リークなどの問題を 解決して、1982年5月、他国に先駆けて初めてLCTコイルの 単独励磁試験4)に成功し、ORNLでの総合励磁試験への見通し を得た。ORNLにはJA-LCTコイルに続いて、GD、CH(スイ スのラテン語の頭文字), EU(ユーラトム), GE, WH-LCT コイルの順に搬入されたが、6個すべてのLCTコイルがそろ ったのは1985年8月であった。6個のLCTコイルが真空容器 内にトーラス配置に据え付けられた状況を図1に示す。真空 容器のふたを閉め排気を開始し、被冷凍総質量420トンの予冷 が完了したのは翌1986年2月であった。1986年3月から6月 にかけて、各LCTコイルの単独励磁試験(定格電流通電、最大 磁場~6.4T発生)が行われた。続いて1986年7月から11月に かけて、6コイルを組み合わせた総合励磁試験の定格実験で あるStandard-1 (パルス磁界なし)がGD, JA, EU, CH, GE, WH-コイルの順で実施された。これによりすべてのLCTコ イルが規定位置で8Tの磁界を発生させ、基本性能仕様を満足

21

国である米国がORNLに準備した試験装置の中にトーラス状 することを実証した。さらに、総合励磁状態で0.14 Tのパル

* 日本原子力研究所核融合研究部 工学博士 LCT日本代表委員 ** 日本原子力研究所核融合研究部 *** 日立製作所日立研究所 工学博士 **** 日立製作所日立研究所 ***** 日立製作所日立工場

600 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)



 図1 真空容器中の6個のLCT(Large Coil Task)コイルとテスト スタンド ORNL(米国オークリッジ国立研究所)の真空容器内でのコ イル配置は、真下のJA(日本)コイルをはじめとし時計回りにCH(スイス のラテン語の頭文字)、EU(EURATOM)、WH(Westinghouse)、GE (General Electric)、GD(General Dynamics)コイルの順番となっている。 なお、写真の提供は米国ORNLの好意による。

ス磁界を繰り返し印加してポロイダル磁界の影響を模擬する

表 I LCTコイルの共通技術仕様 LCTコイルの必要とされるコ イル性能と取り合い条件を示す。

No.	項目	数值
1	最大動作磁束密度	8 T
2	動作電流値	10,000~18,000 A
3	コイルの巻枠寸法	ボアー水平方向 2.5 m ボアー垂直方向 3.5 m
4	質 量	40 t
5	コイルのD型および巻枠の外側寸法	3.6 m×4.6 m
6	定常熱損失	浸漬冷凍 4.2 K 250 W 強制冷凍 3.8 K 394 W
7	初期冷凍の時間	120 h
8	加温の時間	60 h
9	測定素子の種類と取り付け位置	
10	照射加熱模擬および常電導転移をさ せるためのヒータの位置	
11	→ターンが常電導になっても,超電 導におのずと回復すること。	
12	交流磁界	振幅 0.14 T

Standard-2をEU, CH, JA-コイルの順で行ったが, パルス コイルの駆動機構の故障のため, その他のコイルでの実験は 中止された。1987年4月から各コイルの臨界性能を確認する ための拡張試験が実施され, すべてのコイルに9Tの磁界を発 生させることに成功し, 1987年9月にすべて予定されていた LCT試験は完了した。

2 LCT計画の概要

LCTコイルの大きさは核融合用大型超電導トロイダル磁場 コイルに外挿できる設計を確立し,製作上の問題点を解決す るために,実験炉の概念設計からそのコイルの約 $\frac{1}{2}$ の寸法に 決められた。また,LCTコイルに要求される共通技術仕様 (表1)は試験装置を準備する立場からORNLによってまとめ られ,参加国に提示された。主な性能仕様としては,コイル 赤道面内の巻線最内層で8T磁界を発生することと,高磁界領 域の導体の $\frac{1}{2}$ ターンが常電導になってもじょう乱の原因が除 かれれば超電導に回復すること,コイル質量が40トン以下と することなどである。

2.1 LCTコイル諸元

22

LCTコイルに要求される仕様は寸法,質量,電気磁気,熱, 計測などについて取り合い上遵守しなければならない項目と, 一方参加国が自由に選択できる項目,例えば冷却方式,導体 採用したため、両方式の比較検討が可能になった。導体構造 は図2に示すように、各国の独創性を生かして設計されてい る。JAコイル導体はNbTi成型より線を門型安定化銅にはんだ で埋め込み、その安定化銅の液体へリウムに接する面にサー モエクセル加工と黒化処理を施し、冷却特性を飛躍的に上げ るくふうが施されている。一方、強制冷却型のWH、EU、CH コイルの導体は、それぞれまったく別の設計思想で作られて いる。特にWHコイルの導体はNb₃Sn超電導材を用いたより線 をSUSコンジットで囲み、そのより線のすきまに超臨界圧へ リウムを流して冷却するもので、高剛性および高安定性の点 で将来の核融合用超電導マグネットの導体の有力候補と考え られる。また、へリウム容器の材質に関しては、WHコイルの Al合金を除いて他のコイルは低温での高強度、高靱(じん)性 を考慮して、窒素添加のステンレス鋼が採用されている。

2.2 LCTコイル試験装置

LCTコイル試験装置は真空容器, ヘリウム液化・冷凍機, パルスコイル システム, データ収集システムおよび直流電源 から構成される。その主な機器の性能を表3に示す。真空容 器内部のようすを図3に示す。6個のLCTコイルは中心力と コイル荷重を支える中心柱に上下カラーで固定され, さらに コイル間に設けられたトルクリングによって面外力が支持さ れている。6個のコイルと中心柱およびトルクリングは, 六

構造, 巻線万式, コイルケースの材質および構造, 絶縁方法	れている。6個のコイルと中心柱およびトルクリングは,六
などがある。これらの選択の結果、各LCTコイルは表2に示	角形のスパイダフレームで支えられ、さらにスパイダフレー
すようにまったく独創的な特徴を持つものとなった。コ	ムは真空容器底部に置かれた6個の80Kベースで支持される
イル冷却方式としてはJA,GD,GEの3コイルが浸漬(し)冷却	構造となっており, 被冷却総質量は約420トンに達している。
方式を、一方、WH、EU、CHの3コイルは強制冷却方式を	ヘリウム液化・冷凍システムを図4に示す。強制冷却コイ

表2 各LCTコイルの代表的特徴 各LCTコイルとも独自の巻線方式、コイルケースの閉じ方を採用し、正に各参加国の超電導技術の競争となっている。

項	E		参加国		米 国(ORNL)		ユーラトム(KfK)	日本(JAERI)	スイス(PSI)
受		注	先	GD	GE	WН	Siemens	日立製作所	ABB
超	電	違	章 材	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb ₃ Sn	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti
冷	凍	力	页 式	浸 漬 4.2 K	浸 漬 4.2 K	強制・超臨界 3.8 K	強制・超臨界 3.8 K	浸 漬 4.2 K	強制・超臨界 3.8 K
巻	線	ナ	页 式	レイヤ巻	パンケーキ巻	埋め込みパンケー キ巻	パンケーキ巻	パンケーキ巻	パンケーキ巻
構		造	材	SUS 304 LN	SUS 316 LN	A12219-T87(板) A286(ボルト)	SUS 316 LN	SUS 304 LN	SUS 316 LN
定	格	電	流(A)	10,200	10,500	17,760	11,400	10,220	13,000
起	磁		力(AT)	6.40×10 ⁶	$6.53 imes10^{6}$	$7.53 imes10^{6}$	6.70×10 ⁶	6.73×10 ⁶	$5.95 imes$ IO 6
巻	枠の)閉	じ方	溶接	ボルトと溶接	ボルト	ボルトと溶接	ボルトと溶接	ボルト
導	体	样	ようしょう ちょうしん ちょうしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしんしん しんしんしん しんしんしん しんしんしん しんしんしん しんしんしんしん しんしんしんしん しんしんしんしん しんしんしんしんしん しんしんしんしんしん しんしんしんしんしん しん	安定化銅の内側に ケーブルをはんだ 付け	安定化銅の周囲に 超電導線をはんだ 付け	正方形の金属管に ケーブルを挿入	長方形のステンレ ス管内に超電導線 を配置	安定化銅の内側に ケーブルをはんだ 付け	中央の冷却管の周 囲にケーブルをは んだ付け
卷紙	線部のク	レー・	ディング	3	3	なし	なし	2	なし

注:略語説明 GD(米国:General Dynamics)社, GE(米国:General Electric)社, WH(米国:Westinghouse)社, ABB(スイス:Asea Brown Boveri)社, ORNL(米国:オークリッジ国立研究所), KfK(西ドイツ:カールスルーエ原子核研究所), JAERI(日本:日本原子力研究所), PSI[スイス:ポール・シェラー研究所(旧名 SIN)]





強制冷却型導体

浸漬(し)冷却型導体

23

図2 各LCTコイル導体の外観 右半分が浸漬(し)冷却型導体で,左半分が強制冷却型導体を示す。なお,写真の提供は米国ORNLの好意による。

602 日立評論 VOL.71 No.7(1989-7)

表3 LCTコイル試験装置構成機器仕様 LCTコイル試験装置に はヘリウム液化・冷凍機(特に超臨界圧He発生用コールドボックス), パ ルス コイル システムおよびデータ収集システムにくふうが凝らされて いる。

機器名	性能など
真空容器	容器本体:直径11m, 深さ10m 付属物:コイル支持構造物,容器内の真空排気システム
ヘリウム液 化・冷凍機	液化:4.4K, 3601/h(電流供給線用) 冷凍:4.4K, 170W(浸漬冷却コイル用) 3.8K, 1,470W(強制冷却コイル用) 4K, 400W(配管熱侵入) 以上の能力を同時に満足。ヘリウムの温度, 流量の制御 のためのバルブ操作は手動
パルスコイ ルシステム	LCTコイルに0.14 T/sの変動磁界を与える液体窒素冷却の1対のソレノイドコイルと電源により構成。6個のLCT コイルに対応して,位置を回転して実験。
コイルから のデータ収 集システム	VAX 11/780, CAMAC, 計測素子用電源, 増幅器 他に常電導転移検出器あり 一つのコイルへのコンピュータのチャネル数は約100
直流電源	電源本体:12V, 16~12kA 保護抵抗:0.03~0.23 Ω 直流遮断器:2.5kV, 25kA



図3 真空容器内のLCTコイルの組み合わせ構造 6個のLCTコ イルは中心柱およびトルクリングによって支持され、コイルボア部をパ ルスコイルが移動できる構造となっている。

ルヘはコンプレッサで加圧され,補助コールドボックスで冷却された15 bar, 3.8 K超臨界圧へリウムが供給され,一方, 浸漬冷却コイル,中心柱および電流リードへは1万9,000 lおよび2,000 lデュワーから並列に液体へリウムが供給される構成になっている。

LCTコイル(試験位置コイル)ボア内に設置され0.14 T/sの

24

繰り返しパルス磁界を発生する液体窒素冷却パルスコイルは, スパイダフレームに固定された支持構造物によって支持され, 真空中でトーラス方向に移動できる駆動機構を持っている。 各LCTコイルごとに定格電流,絶縁耐電圧に応じて電源(± 12 V, 16~25 kA),保護抵抗(0.03~0.23 Ω),直流遮断器(2.5 kV, 25 kA)が設けられ,コイル保護装置としては誘導電圧を



図4 LCTコイル実験装置のヘリウム液化・冷凍システム 浸漬冷却コイルおよび中心柱への液体Heの供給は 19,000 デュワから直接行われ,強制冷却コイルへの超臨界圧Heの供給は補助コールドボックスを通して行われる。

補償コイルで消去して、微少な抵抗電圧を検出できるクエン チ検出器が用意されている。

データ収集システムは、中央処理コンピュータ(VAX780)に 接続された端末マイクロコンピュータ(LSI-11)からデータを 取得する構成となっており、すべての計測データは応答性の 速いものと遅いものに分けて収集され、得られたデータは直 ちに端末スクリーンにアナログとディジタルデータで示され、 実験を進める上での判断材料とされた。

2.3 実験項目

LCTコイルの予定された実験項目は、大別して定格実験 と拡張試験に分けられる。前者が基本的に満たすべき性能 を実証するものであるのに対し、後者はコイルの臨界性能 を確認するための過負荷試験である。これらの実験項目と実 験内容を定量的物理量で表し、核融合炉としての意義を表4 に示す。

3 実験結果

3.1 初期冷却

LCTコイルの性能仕様では、コイルは120時間で室温から



図5 6個のLCTコイルの予冷曲線 各コイルとも同じスピード で冷却されているが、超電導状態に入ったのはNb3Snを用いたWHコイル が最初である。

4 Kまで冷やしても、どんな損傷もないことが求められている。 事実JA-LCTコイルは国内試験で本条件を満たすよう予冷を 実施し、問題のないことを示した。ただし、ORNLでは、液 化冷凍機の能力と強制冷却コイルに対する冷却速度の制約が あったためと、途中Heの液化作業を行ったために4Kに冷却 するのに約750時間を要した。コイル内の代表的位置の予冷特 性を図5に示す。最初に超電導状態に入ったのはNb₃SnのWH コイルで、遅れて他のNbTiコイルはほぼ同時に到達した。 3.2 定格実験

3.2.1 Standard-1

JAコイルは、Standard-1で以下の実験結果を得た。

(1) JAコイルの試験コイル位置で、コイル赤道面巻線部最内 層で磁界8Tの発生を確認した。

(2) 定格通電時のJAコイルの熱損失〔幅(ふく)射,伝導,接
続部の発熱の合計〕はHe液面の減少から75 Wと求められた。
(3) 定格通電時での導体,コイル巻枠のひずみ量および両者

25

表4 実験項目と内容 実験としては義務づけられている定格実験とその他の拡張実験に分けられ、その核融合炉としての意義と実験内容,お よび目標とした物理量を示す。

	実験標題	核融合炉としての意義	実験内容	目標とした物理量
	Single		単体通電予備実験,特に計測系および緊急放電系の 確認	定格電流値(100%)の通電(発生磁界6.4T)
定格実	Standard-1	磁界 8 T でのトロイダ ルコイルの実証	テストコイルに100%通電,残る5個のコイル80% に通電。これにより8T発生し,核加熱印加, 量タ ーン超電導復帰の実証	定格電流値(100%)の通電と定格磁界8.0 T
験	Standard-2	Standard-1にパルス磁 界が加わった運転の実 証	Standard-1にパルス磁界を加えて,損失を測定	Standard-1の条件に0.14 T/sのパルス磁界を0.14 T まで印加
拡	ALT-A	限界磁界値の確認	6個のコイルを同時に定格以上の電流値に上昇し, 均質なトロイダル磁界での最大磁界を確認	9 Tの磁界発生(6個のコイルに同時に定格電流値の約110%通電)
張 実 験	ALT-B	トロイダルコイル欠落 状態での作動確認	6個のコイルのうち、 I 個のコイルの通電欠落状態 での隣接コイル応力値の確認	左記実験内容によりコイルケースに60~70 kg/mm ² の応力値の発生
	ALT-C	限界電流値の確認	テストコイルに140%まで通電を試みる。	定格電流値の140%の通電

604 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)



図 6 定格実験Standard-1でのJA-LCTコイルの機械的特性 (a)巻線部とコイルケース間の相対変位は軸方向よりも径方向のほうが大きい。 (b)巻線部のひずみはコイル巻線最内層の上下部とコイル直線部側面に大きな値が表れている。(c)コイルケースのひずみは巻線部に発生するひずみより全体的に小さくなっている。

の間の相対変位量を図6に示す。導体の平均的ひずみ量は

1,000 ppmで応力値としては150 MPa程度となる。一方,コイ ル容器外周リングに発生するひずみは400 ppmで80 MPaと応 力値が低い。このことはコイル巻線部自身で電磁力を支持し ていることを示す。また、巻線部とコイル容器間の相対変位 は、電磁力分布とよく対応し数百マイクロメートルの桁(けた) であった。

(4) ¹/₂ターン常電導から超電導への復帰の確認であるが, 図7 に示すように8T磁界部でも完全安定性によって2秒以下で 超電導状態に復帰した。このことは, JAコイルの特徴とする 導体表面構造(サーモエクセル:高熱流束)が有効であったこ とを示すものである。

(5) 模擬核加熱量の安定限界の測定は、巻線内部に分布して 配置した八つのヒータを用いて行った。8T発生時に、全ヒー タのパワーが576W, つまり導体加熱部で55mW/ccを1分間 保っても常電導部は発生せず、コイルを安定に通電できるこ とを示した。このことは、FER(核融合実験炉)のトロイダル 磁場コイルの核発熱の設計値1~10mW/ccに対し実験面か らの根拠を与えるものである。6個のコイルはStandard-1の 条件を満たすことができたが、この実験によって2個のコイ ルに技術的問題があることがわかった。一つはCHコイルで、 巻線部に加わる面外力が実験モードの変更によって,その方 向が反転するたびにクエンチが生じた。これは導体の安定性 が低い上に, 巻線部とコイル容器間に滑りが発生したためと 思われる。一方, WHコイルは約10 kA(定格電流の56%)から 微小電圧を発生し,電流増加とともに増大して定格電流値で の発熱量は200 Wに達したが、クエンチには至らなかった。WH コイルはこのような状況でも、安定性試験で1.7 J/ccの熱じょ

 $\mathbf{26}$



時間(500 ms/div.)

う乱を加えても安定に運転できたことは特筆に値する。これ はNb₃Snの温度マージンの大きさに起因している。 3.2.2 Standard-2

この実験はパルスコイルを0.14 Tの磁界まで1秒で立ち上 げ、14秒間磁界を保持し、次の1秒間で減衰させ、このパル ス励磁を150秒周期で数十回繰り返すことによって、LCTコイ

核融合用LCT超電導マグネットの開発 605

ルの交流損失の測定をするなど、パルス磁界の影響を試験す るものである。ただし、本実験はパルスコイルが途中で移動 できなくなったため、EU、CH、JAの3個のコイルに対して だけ実施された。LCTコイルのような大型超電導コイルの交 流損失が実際に精度良く測定されたのは世界でも初めてのこ とである。三つのコイルのパルス磁界による交流損失量(巻線) +巻枠)のコイル電流依存性を図8に示す。JAとCHコイルの 交流損失はコイル通電電流の大きさに依存せず約15Wと求め られ、この値は理論解析値とよく一致することが確認された。 一方、EUコイルの損失量が前者に比べ多い理由は、導体断面 内角部で素線どうしが接触し、巻線内での交流損失が多くな っているためと思われる。また、JAコイルはパルス磁界の印 加と同期してシターン常電導復帰と核加熱試験を同時に実施 したが、ヒータで強制的に常電導遷移させた領域が加熱終了 後直ちに超電導状態に復帰し、コイルは安定に通電されるこ とも確認した。なお、Standard-2で得られた電磁気的特性と 機械的特性はStandard-1とまったく同じであった。ただし、 パルス磁界による転倒力が発生し、コイル容器側板と巻線間 の相対的変位はコイルの上部と下部で符号が逆転し、パルス



図8 定格実験Standard-2でのパルス磁界損失 JAコイルとCHコ イルの交流損失量は同一であるが、EUコイルは高い値を示している。

磁界と同期して変化することが予想どおり観測された。

3.3 拡張実験

3.3.1 ALT-A

この実験は各コイルの磁界の限界を求めるもので,JAコイ ルは定格電流値の106%(10,802 A)を通電し,他のコイルから の磁界を加えて最高9.1 Tに達しても安定に運転できることを 示した。このときに発生した導体の平均ひずみ量は1,300 ppm でStandard-1の外挿上にあり,導体の0.2%耐力値以下となっている。各コイルのALT-A実験結果をまとめて表5(a)に示す。本計画の当初はNb-Ti材で9Tの壁を越えるのは困難と思われていたが、いずれのコイルでも9T以上の励磁を達成することができた。また、WHコイルのテスト位置で超電導トロイ

表5 拡張実験結果 拡張実験ALT-A, ALT-B, ALT-Cにおける各LCTコイルの臨界性能を示す。

(a) ‡	広張実験ALT-	4(6	う個のコイ	ル	で同時に最大磁界	への挑戦)での各	コイ	́Л	レ達成臨界値
-------	----------	-----	-------	---	----------	------	------	----	----	--------

項目	日本	スイス	ユーラトム	米国WH	米国GE	米国GD
電 流 値(A) (定格に対するパーセント)	10,802 (106%)	12,870 (99%)	12,084 (106%)	19,181 (108%)	, 30 (06%)	9,996 (98%)
最高磁界(T)	9.1	9.1	9.2	9.0	9.2	9.0
動作温度(K)	4.4	3.8	3.8	3.8	4.4	4.4
状況	転移せず	転移せず	転移せず	最高磁界部で転移	転移せず	転移せず

(b) 拡散実験ALT-B(隣接コイル欠落での運転)での各コイル臨界値の達成力

(1個のコイルの故障モード、その両側のコイルのふるまい調査)

コイル名	米国GE・ユーラトム	ユーラトム・日本	日本・米国GE	米国GD・スイス	スイス・米国WH
項目	米国GE・ユーラトム	ユーラトム・日本	日本・米国GE	米国GD・スイス	スイス・米国WH
	22.9 22.9	26.6 25.5	14.6 14.6	10.6 11.6	11.6 11.1
状 況	この値でスイスコイルが転移	転移なし	この値でスイスコイルが転移	転移なし	転移なし

(c) 拡張実験ALT-C(単一コイルでの大電流への挑戦)での各コイル達成臨界値

(単独通電 140%)

27

- / 11 /7				
	- / -	/	W FIOF	

項目	日本	~1 ~	ユーノトム	不国W日	不回GE	不回GD
電流値(A) (定格に対するパーセント)	14,061 (138%)	15,496 (119%)	15,949 (140%)	23,134 (131%)	14,580 (139%)	12,200 (120%)
最高磁界(T)	8.8	7.6	9.0	8.1	8.9	7.7
動作温度(K)	4.4	3.8	3.8	3.8	4.4	4.4
状 況	最高磁界部で転移	巻線部の動きで転移	転移せず	最高磁界部で転移	最高磁界部で転移	低磁界部で転移

606 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)

ダル磁場コイル系として世界最大の蓄積エネルギー944 MJを 記録したが、電流保持中WHコイルの発熱量が700Wに達しコ イル最高磁界部からクエンチが発生した。

3.3.2 ALT-B

最大面外電磁力が発生するこの実験条件を満たすために, 設計段階では応力解析に多大な努力が払われた。実際の実験 でもコイル破損の可能性がもっとも高く、仕様書にある値ま で十分な実験を行えたのはJAコイルとEUコイルだけであっ た。この実験でJAコイルはCHコイル短絡とGDコイル短絡の 二つの場合について行われた。それぞれの場合の面外力およ びコイル容器上(中心柱側)のひずみ量を図9に示す。GDコイ ル側に吸引された場合,コイル容器外表面角部に最大圧縮ひ ずみ1,700 ppmが発生したが、JAコイルはなんら損傷を受け ることなく実験を終了した。各コイルのALT-Bの実験結果を 表5(b)に示すが、CHコイルが異なった方向の面外力を受ける たびに、クエンチを繰り返していることがわかる。

3.3.3 ALT-C

この実験は、コイル単独励磁で定格電流値の140%までの通 電に挑戦するもので、その結果を表5(c)に示す。EUコイルだ

電流値の138%で最大磁界部よりクエンチが発生した。GEコイ ルでは139%で常電導電流の分流開始を確認し、直ちに電流を 降下した。GDコイルは低磁界第3グレーディング導体より120 %で転移した。WHコイルは先に記した発熱により転移し、CH コイルも先に記した導体の微動により転移した。

4 結 言

LCT計画のように大型超電導コイルが導体構造、冷却方式 を異にして、同一実験条件下で各コイルの諸特性を実際に比 較評価されたのは世界で初めてのことである。LCTコイルの 設計, 製作, 実験を通じて得られた経験や実験結果は, 将来 の核融合用大型超電導コイルを設計、製作するうえで重要な 指針を示したばかりでなく、国際共同研究の名のもとに各国 の代表者が米国ORNLに集まり、一つの目標に向かい一致団 結して、各自に割り当てられた責任分担を遂行し、プロジェ クトを成功に導いた点でLCT計画は超電導コイル開発の歴史 の中に大きな1ページを残したものと言える。上記の技術デ ータを総合的観点から見ると、次のような意義と成果をもた らした。

けがこの目標値を達成したが、確かに励磁中の電圧スパイク の発生も少なかったが運転温度が3.8Kと浸漬冷却コイルに比 べ低かったことも、この成果の一因である。JAコイルは定格



(1) LCT規模の超電導コイルで、浸漬冷却方式の技術は成熟 したが、強制冷却方式では未熟な点が残っていることがわか った。しかし、さらに超電導コイルが大型になった場合、電 磁力と耐電圧の観点から強制冷却コイルの開発の必要性が明 確になった。

(2) JAコイルは、すべてにわたり設計性能を十分に発揮した。 この体験によって核融合用超電導コイルの設計が現実的なも のに大きく進展した。

(3) 大型技術の開発では、その発想・設計が優れていても製 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) 「LCT計画」は国際協力による効率的作業が可能であるこ とを実証した。

最後に,本計画の遂行に当たり,LCT日本代表委員であっ た故日本大学理工学部教授・日本原子力研究所特別研究員安 河内昻先生のご指導および関係各位のご尽力に対し深く謝意 を表す次第である。

参考文献

JA

14.6 MN/

単位:ppm

- 1) D. S. Beard, et al. The IEA Large Coil Task, Fusion Engineering and Design FEDEEE 7(1 & 2), 1-232(1988)



 $\mathbf{28}$

図9 ALT-B実験でのJA-LCTコイルの赤道断面水平方向のひず み分布 ALT-B実験はコイルケースにとっていちばん厳しい実験条 件で、コイルケース側板角部に最大圧縮ひずみ-1,700 ppmを記録した。

- 2) 島本,外:LCT計画の概要,低温工学,Vol.19, No.2, p.3 (1984)
- 島本、外:日本のLCTコイルの開発作業と設計・製作、低温工 3) 学, Vol.19, No.2, p.46(1984)
- 多田,外:LCTコイル国内実験の熱的結果,低温工学, 4) Vol.19, No.2, p.83(1984)