プール冷凍型（日本）及び強制冷凍型（ユーラトム） LCT コイル国内実験結果の比較評価†

辻 博史, 島本 進, Albert ULBRICHT*, Peter KOMAREK*,
Heinrich KATHEDER*, Fritz WÜCHNER*, Gernot R. ZAHN*

日本原子力研究所 茨城県那珂郡那珂町向山

* カールスルーエ原子力研究所 7500 Karlsruhe, Federal Republic of Germany

(1985年7月3日受理)

The Experimental Results of the Domestic Tests of the Pool Boiling
Cooled Japanese and the Forced Flow Cooled Euratom LCT Coils

Hiroshi TSUJI, Susumu SHIMAMOTO, Albert ULBRICHT*, Peter KOMAREK*,
Heinrich KATHEDER*, Fritz WÜCHNER* and Gernot R. ZAHN*

Japan Atomic Energy Research Institute

Mukaiyama, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken 311-02 Japan

* Nuclear Research Center Karlsruhe

P.O. B. 3640, 7500 Karlsruhe, Federal Republic of Germany

(Received July 3, 1985)

Synopsis :

The "Large Coil Task (LCT)", an international project of technology development under the auspices of the IEA, is performed to develop large superconducting toroidal coils for tokamaks. The participants are the U.S.A., Switzerland, Euratom, and Japan. Among the six coils being developed under this program, domestic single coil tests of the pool boiling cooled Japanese coil and the forced flow cooled Euratom coil were carried out successfully in June 1982 and in April 1984, respectively. These two LCT coils are the first to compare experimentally the characteristics of pool boiling cooled and forced flow cooled large coils for a tokamak. Major results obtained in the two domestic tests are described for the purpose of intercomparison of the two designs.

1. はじめに

国際エネルギー機関 (IEA) を軸とする大型コイル事業 (LCT) は、今後の核融合炉に必要な不可欠な大型超電導トロイダル・コイルの開発を目的として、1977年に開始された。この国際協力作業への参加国は、米国、スイス、ユーラトム及び日本の4者であり、各国の創意と工夫に基づいた LCT コイルが全体で6個、開発された。これらの内、3個 (米国2, 日本1) はプール冷凍、他の3個 (米国, スイス, ユーラトム) は強制冷凍に基づくコイルである。これらのコイルは、米国オークリッジ国立研究所に集められ、総合的な組合わせ実験にむけて準備が進められている。一

方、日本のコイル及びユーラトムのコイルは、米国での総合実験に先立って、それぞれ日本原子力研究所 (原研) 及び西独の Karlsruhe 原子力研究所 (KfK) において単独コイルの国内実験が行われた。前者はプール冷凍、後者は強制冷凍であることから、二つの国内実験は、両冷凍方式について同等な大型コイルを用いて実験的な比較を行う最初の機会となった。本論文では、両実験結果を相互比較の視点から整理し、総合的な検討を行う。

2. 両コイルの特徴

日本のコイル (JA コイル) 及びユーラトムのコイル (EU コイル) は、ともに同一の技術的目標¹⁾ に向かって設計されたものであるが、その具体的な実現法

† 英語論文は Cryogenics Vol. 25 No. 10. に掲載

Fig. 1 a) Japanese LCT coil at JAERI (left). b) Euratom LCT coil at KfK (right).

としては異なった試みがなされた。すなわち、JA コイルでは、熱的な安定性を最優先してプール冷凍を採用し、EU コイルでは、機械的剛性の確保を重視して強制冷凍を採用した。それぞれのコイルについて原研及びKfKで行われた設計及び実証試験の結果、Table 1に示すようなコイル・パラメータが決定され製作が行われた。Fig. 1には、それぞれの国内実験装置に据付け作業中のJA コイル及びEU コイルを示す。

JA コイルの設計においては、少なくとも cold end recovery 特性を得るべく、数多くの高熱流束型導体表面の試作開発を行なった。その結果、通常の平滑表面に比較して3～4倍の冷却熱流束を得て、最終的にはJA コイルの完全安定性を実現することができた^{2),3)}。

EU コイルの設計においては、NbTi による強制冷凍導体を用いるとともに、超臨界ヘリウムの温度を3.8Kまで下げて臨界電流特性に余裕を持たせた⁴⁾。ヘリウムの設計流量は300 g/sで、入口圧力としては6～15 bar、許容最大圧力としては25 barとした。また、初期冷凍及び運転中のコイル内圧力損失を低くするために、2本ずつ導体を束ねて巻線する手法を用いた。

JA コイル及びEU コイルの導体の断面写真をFig. 3に、それぞれの巻線について組成比較をFig. 4に示す。NbTi とヘリウムの面積比は両導体で同等であるが、JA コイルの導体では、銅安定化材の比率が54%

JA LCT Conductor (8-T Grade)

EU LCT Conductor

Fig. 2 Schematic cross-section of the JA- and EU-LCT conductor.

に達する事に対し、EU コイルの導体では、30%の面積を強度要素であるステンレス鋼のコンジットと Vavromium* の平板コアに使用している点が両者間の主要相違点である。この結果として、JA コイルでは常電導転移時のジュール発熱量が低くなり完全安定性が得られるのに対し、EU コイルでは、含浸技術も併用することにより巻線の機械的強化をはかることができる。また、JA コイルでは、この安定性に基づいてEU コイルの保護放電時定数(7秒)より長い時定数

* CrNi ステンレス鋼

(20秒)での保護放電が可能である。したがって放電時最大電圧は, JA コイルが1.0kV, EU コイルが2.5 kV となっている。

3. 国内実験のための冷凍システム

各コイルの実験のために, 原研と KfK では, それぞれ, SETF, TOSKA と呼ばれる大型超電導コイル試験装置を建設した。SETF⁵⁾の冷凍機容量は1.2 kW(4.5K), 350l/h であり, TOSKA⁶⁾では, 550W

(4.5K), 150l/h のものと 400W(4.5K) 85l/h のものを組合わせて使用している。また, TOSKAでは, 超臨界ヘリウムの強制流を作るために容量150 g/s のヘリウム・ポンプが3,000 l 液体ヘリウム中で動作している。Fig. 5は SETF と TOSKA の冷凍システムの主要構成を示したものである。

300K からのコイルの初期冷凍では, JA コイル, EU コイルともに, 冷凍機と閉ループで直結されて冷凍される。初期冷凍後, プール冷凍の JA コイルで

Table 1 Major Features of Japanese and Euratom LCT Coils

	JA-LCT	EU-LCT
Bastic specification		
Max. magnetic field	8.0T	8.0T
Coil external size	4.6m×3.6m	4.6m×3.6m
Similar features		
Superconductor	Nb-Ti	Nb-Ti
Rated current	10.22kA	11.4kA
Number of turns	658	588
Winding	20double pancakes	7 double pancakes (two conductors wound in hand)
Winding current density	24.2MA/m ² (8-T grade) 30.3MA/m ² (5-T grade)	25MAm ²
Self-inductance	2.0H at 4.2K	1.59H at 4.8K
Structural material	S. S. 304 LN	DIN 1.4429, similar S. S. 316 LN
Assembly	Bolts with seal welding	Bolts with seal welding
Winding weight	18,000kg	18,000kg
Total weight	39,000kg	39,000kg
Different features		
Coil cooling	Pool boiling cooling	Forced flow cooling
Operating temperature	4.2K	3.8K
Operating pressure	1.2~1.5bar	6~15bar
Test pressure	8.8bar	25bar
Helium inventory	2,200 litres	630 litres
Conductor position in pancake	Edgewise	Flatwise
Grading	2 (8T, 5T)	No grading
Number of double pancakes	20	7
Number of cooling paths	1 wdg., 1 case	28wag., 2case
Current density in conductor copper	44MA/m ² (8-T grade) 52MA/m ² (5-T grade)	83MA/m ²
Joule heating in copper at 8T and rated current	231W/m	518W/m
Designed dump voltage	1.0kV	2.5kV
Test voltage	3.0kV, 300K He	10.0kV at 5K

a)

b)

Fig. 3 a) JA-LCT conductor (upper).
b) EU-LCT conductor (lower).

Fig. 4 Composition of JA- and EU-LCT windings.

は、Fig. 5の液体ヘリウム・デューアー(5,000 l)より集中的な液送を行なってコイル内に液を溜め、それ以後は冷凍モードによる運転によって、ヘリウム液位を維持する。強制冷凍のEUコイルでは、初期冷凍後、冷凍機との直接結合を解いて、Fig. 5のヘリウム・ポンプを起動し、2次ループとして超臨界ヘリウムを循環させている。TOSKAでは、容積1.85m³、最大圧力18bar、温度約20Kの低温バッファ・タンクを備えているため、コイルの急速放電等、過渡的な発熱による圧力上昇時においても、相当程度まではヘリウムを大気放出することなく系内に保持しておくことが可能である。

4. ヘリウム・リーク及び耐電圧特性

ヘリウム・リーク及び耐電圧特性は、コイルの信頼性確保のために重要な初期検査項目である。Table 2は両コイルの検査結果を比較したものである。ヘリウム・リークについては、JAコイルは検出感度以下であり、EUコイルでは、300Kで 6×10^{-7} mbar l/sと測定された電流リード系からのリークが10Kへ冷凍したことによって、約10³倍増大した。ただし、ヘリウムの状態変化を考慮すると、いわゆるコールド・リークに特有なクラックの増大は僅かであったと考えられる。

耐電圧特性に関しては、Table 2に示したとおりEUコイルが非常に勝れた特性を示し、強制冷凍コイルの特徴を実証した。高耐電圧性は、大型コイル・シ

Fig. 5 Schematic cryogenic flow sheets for the domestic test of the pool boiling cooled JA- and the forced flow cooled EU-coil.

Table 2 Initial Checkouts of JA and EU Coils. Determination of Leak Rates and Electrical Insulation Properties.

Test	Boundary Conditions	Coil	Temp. K	Pressure bar		Value Measured
				VCL+B	coil	
Leak rate	Coil+all components in insulation vacuum	J A	300	1.8	1.8	$<2\times10^{-7}$ mbar l/s
		EU	300	1.3	6.5	6×10^{-7} mbar l/s
		J A	4.2	—	—	no cold leak
		EU	10	1.25	9.5	8×10^{-4} mbar l/s
	Coil alone	J A	300	—	—	—
		EU	300	—	6.5	5×10^{-8} mbar l/s
High voltage	Winding + vapour cooled leads + sc bus against coil case	J A	20	1.2	1.2	DC 3kV, 25MOhm
		EU	5*	1.2	6	DC 7kV, 3GOhm DC 10kV, 2.5GOhm

(VCL + B: vapour cooled leads + sc-bus)
* VCL + B were filled with LHe 4.2K

Fig. 6 Cooldown results of JA- and EU-LCT coil.

システムの信頼性を上げるとともに、コイルの直列化による電流リード冷凍負荷低減の可能性を示すものである。

5. 初期冷凍特性

JA コイル及び EU コイル初期冷凍結果の比較を Table 3 と Fig. 6 に示す。使用されたヘリウム全流量は両コイルともほぼ同等であるが、コイル内の分配では次の様な相違がある。すなわち、プール冷凍の JA コイルでは巻線中での圧損が僅かであるため、全流量の 85% である 34 g/s を最初から巻線部に流すことができた。したがって、コイル容器へのヘリウム流量は 6 g/s のみであるが、巻線中を流れるヘリウムがコイル容器を内面から強力に冷凍したため、コイル全体はバランスよく冷凍された。一方、強制冷凍の EU コイ

Table 3 Cooldown Properties of the Two Coils

	JA-LCT	EU-LCT
Helium Flow rate		
Winding (typical)	34 g/s	18 g/s
Coil case (typical)	6 g/s	18 g/s
Temperature difference		
Guiding value within winding	96K	≤ 40 K
Winding-coil case	96K	≤ 40 K
Max. within winding	95K	40 K
Winding-coil case	95K	80*K
Helium pressure		
Max. inlet press.	1.5bar	12bar
Max. press. drop	—	8 bar
Cool-down time		
Starting date	May 18, 1982	March 15, 1984
300K to SC	120 hours	203 hours

* To increase the rate of cooldown temperature sensors in the poorly cooled coil case edges were removed from the 40K-condition in agreement with the coil manufacturer.

ルでは、巻線流路（長さ160m～245m）での圧損が高温時に大きい。したがって初期冷凍開始時に、巻線へ全流量の50%である18 g/s を流し、その圧損が8 bar となった。また、コイル容器へは、JA コイルでの3 倍にあたる18 g/s を流した。ただし、JA コイルの様

に14の制御バルブが取付けられた。EU コイルの大部分の流路長は245mであるが、巻線端部に160mの流路が四つある。強制冷凍コイルの初期冷凍において、ある流路の温度が平均より速く下がると、圧損がより一層低下してその流路のヘリウム流量が増大するという不安定性が従来から懸念されてきた。そこで EU コイルに多数のバルブを付けて実験に臨んだが、現実にはこの様な不安定性は発生しなかった。この理由としては、次の二つが考えられる。一つには、巻線端部の短かい流路が電流リードからの熱侵入によって他の部分より冷えにくかった事、また、第2の理由としては、流路間の熱結合によって、ある流路だけが熱的に独走しえない状況にあった事が挙げられる。電気絶縁を介する導体間の熱的緩和時定数を計算してみると約10秒となる。この値は、初期冷凍のような時間単位の現象においては、十分な緩和効果を示し、不安定性を除去したものと考えられる。したがって巻線内部の熱結合を良くした強制冷凍コイルでは、各流路ごとの流量制御バルブの必要性は従来考えられてきたよりも低いと判断される。

8. 通電特性

JA コイル、EU コイルともに10kA まで、トレーニングもまったく示すことなく通電に成功した。この実験での特性値の比較を Table 4 に示す。EU コイルの場合、定格電流値は11.4kA であるが、電源容量の制約のため10kA (定格の88%) までの実験となった。

JA コイルの 10kA 通電実験時の常電導転移検出器の設定は、コイルの中点タップでの不平衡分として、200mV、1 s 以上とした。初回10kA通電時には、5 mV

前後の不平衡電圧 (ただし、30Hz 程度のローパス・フィルタを介する) が、とくに 8 kA 以上にて何回か検出されたが、常電導転移はまったく起こすことなく10kA に達した。定格 10. 2kA 通電時での最大磁界は 6. 4 T、蓄積エネルギーは 106MJ であった⁹⁾。

EU コイルの常電導転移検出は、巻線部を 7 分割する各ダブル・パンケーキごとに中点タップの不平衡電圧を検出して行った。検出器の設定は、おのおの 50 mV、1 s 以上とした。EU コイルの通電は前述の様に定格電流値の88%までであるが、各検出器にてほとんど有意な信号を検出することなく 10kA へ達した。この際の検出感度は 0. 4mV であったが、これは、導体 2 cm が常電導転移した場合に発生する電圧に相当する。一方、同時に測定したコイルの Acoustic Emission 信号は、電流が上昇するにつれて高頻度で検出された。以上の結果を総合的に判断すると、通電によって、巻線の含浸材にマイクロ・クラックが数多く発生したが、マクロな巻線の動きにまでは至らなかったものと考えられる。EU コイル 10kA 通電時の最大磁界は 5. 6 T、蓄積エネルギーは 80MJ であった。また 13ヶ所の導体接続部でのジュール損失は、10kA において合計でも 1 W以下と測定された。

9. 機械的特性

機械的特性は大型コイルの開発にあたって、とくに重視すべき課題である。そこで、JAコイル、EUコイルともに、巻線・コイル容器間相対変位と、コイル容器歪の測定を行った。また、加えて JA コイルでは巻線歪を、EU コイルではコイル容器内ボアの変形量も測定した。

Table 4 Main Data of the Charging Tests

	JA-LCT	EU-LCT
Current tested	10. 2kA	10. 0kA
Ratio to the design current	100%	88%
Current sweep rate	2. 8A/s	3. 3A/s
Max. magnetic field	6. 4 T	5. 6 T
Stored energy	106MJ	80 MJ
Training or quench	None	None
Number of chargings up to 10kA	4	9
Wire movement during charging	A few	None within measuring accuracy
Heat load at 10kA	106W	127W
Max. stress in the conductor	176 MPa	No data measured
Max. stress in the coil case measured	78 MPa	174 MPa

JA コイル, EU コイルの巻線部とコイル容器内リング間の相対変位測定結果を Fig. 9 に示す。両者間のギャップはフープ力によって拡大する傾向にあり, JA コイルではD型上部における 0.66mm, EU コイルではD型直線部中央における 1.44mm がそれぞれ最大の相対変位であった。フープ力によって単一卷線が円形に近づくようする変形傾向と EU コイルの測定結果はよく対応しており, その巻線部が機械的には一体物に近い振舞いをしていることを示唆していると考えられる。ただし, 測定された絶対値 1.44mm は応力解析で予想した値の約10倍に達するものである。この理由としては, 応力解析で用いた巻線の厚み方向の剛性 (60GPa) に対して, 実際の剛性は, その約 1/10 しか得られていない事が挙げられる。この事実は別途製作した実証試験サンプルによって確かめられたものであり¹⁰⁾, この結果を応力解析に反映すると測定された大きな変位を説明することができる。この様な剛性低下は, 巻線の曲率に依存しており, 曲率の最も小さいD型直線部において顕著である。この部分はテンションをかけた巻線時に導体に垂直な圧縮力を最も発生しにくい所である事がその原因と考えられる。したがって, 強制冷凍コイルでは, 今後, 導体構造や巻線方法を工夫することによって, この様な剛性低下を防ぐための開発を行う必要がある。一方, Fig. 9 に示す様に JA コイルの変形モードは, 巻線部が一体的に振舞うモデルでは説明が困難である。一つの推量としては, 巻線部を構成する導体が相互に完全には一体化されていないために巻線全体としての曲げ応力に対する剛性が低いこと, 及び巻線部を支えるコイル容器の剛性がD型上部で低下していることの2点によっているとの説明が試みられているが, 断定するには至っていない。

Fig. 10 は EU コイルの巻線とコイル容器内リング

Fig. 9 Relative displacement between winding and inner ring.

Fig. 10 Changing of spring constant for the Lorentz-forces in EU-LCT coil case above 7kA.

Fig. 11 Relative displacement between winding and sideplate.

の相対変位, コイル容器内ボアの変形量, 及びコイルのD型直線部外側での変形量を, コイル電流値の2乗 (I^2) に対してプロットしたものである。コイル容器内ボアの変形量は 10kA において -0.85mm であった。Fig. 10の結果より, 7.5kA 近辺を境にして, 巻線からコイル容器への電磁力伝達が良好となり, 変位から見た等価剛性の変化が現われている。

Fig. 11 は, 巻線部とコイル容器側板の相対変位について, JA コイルと EU コイルの測定結果を比較したものである。両者の主要な相違は, 10kA 通電によるフープ力下において, JA コイルでは, 巻線と側板間のギャップが増大し, EU コイルでは, そのギャップが僅かずつではあるが減少していることである。Fig. 12はこの結果を説明するために考えられた一つのモデルであるが, 同図中にて右向きの応力が主として巻線部の左側に加わるとした場合, EU コイルの変形モードは一体物のそれに近いことがわかる。一方, JA コ

イルでは、Fig. 12 から推定されるように巻線部の側面も内側へ変形している可能性が大きく、巻線部が一体物として振舞う場合の反対の特性を示していると考えられる。Fig. 9 の検討で指摘したように、JA コイルの巻線各部が完全には一体化されていないとすると、巻線部側面に働く内向きの電磁力によって、Fig. 12 の様な内向きの変形も発生しうると考えられる。

JA コイルの巻線部の歪測定結果はすでに本誌¹¹⁾に報告されているが、その要点は応力解析と実証試験¹²⁾による設計値である50MPa（巻線内部でほぼ一定）に対して、実際の測定値は、1/2～3 倍とかなりの分布を示した事であった。この相違を説明するために、解

析的検討が続けられている。

Fig. 13 a と 13 b は、10kA 通電時にコイル容器に発生した歪について、JA コイルと EU コイルの測定結果を示したものである。JA コイルに関する Fig. 13 a では θ を付したものは周方向歪、 γ を付したものは前者に対して垂直な歪成分を示す。歪値の符号の正は引張り歪、負は圧縮歪である。また、比較のために各点

Fig. 12 Schematic cross-section through a LCT coil for explanation of the deformation of the JA- and the EU-winding under Lorentz-forces.

Fig. 13 a Stress distribution in the JA-coil case (θ : stress in azimuthal direction; r : stress in radial direction).

Fig. 13 b von Mises stresses and principal stress directions on the coil case surface of the EU-coil.

における応力解析値を括弧内に示した。これらの測定値と解析値を比較すると、全体的な分布の傾向は一致していること、及び全般に測定値が解析値より低い事がわかる。この事実は、巻線部の歪が解析値より高い部分が多かったことと考えあわせると、JA コイルでは、巻線からコイル容器への応力伝達が完全ではないことを示していると考えられる。また、この応力伝達について、EUコイルの場合ではコイル電流値 7.5kA 近辺にて、Fig. 10 に示したように明らかな変化が見られたが、JA コイルの場合、とくにこのような傾向は見られなかった。一方、Fig. 13 b は、EU コイルについて、測定値と解析値を示したものである。測定にはロゼット・ゲージを用いているので、主軸の測定結果も図中 ϵ_1 として示した。これら測定値と解析値はほぼ対応しているが、D型直線部において測定値が50%以上高くなっている。この事実は、Fig. 9 で検討した巻線部の低剛性とそれに伴って変位が大きくなった部分と場所的に対応しており、相互に関連があるものと考えられる。

以上を総合すると、両コイルの機械的特性比較は次のように要約される。

[JA コイル]

- ①設計値に比較して、実際に発生した応力の傾向は、巻線部で高く、コイル容器で低かった。
- ②この理由はまだ十分に解明できていないが、658 本の導体で構成される巻線が、機械的に完全な一体物としては振舞っていないこと、及び、巻線からコイル容器への応力伝達が十分でなかったこと等がその原因として考えられる。

[EU コイル]

- ①巻線部は一体物に近い挙動を示し、設計と実際の対応は比較的良好であった。
- ②しかしながら、D型直線部において、巻線厚み方向に1/10近い剛性低下が見られた。巻線とコイル内リング間に測定された大きな相対変位や、コイル容器D型直線部に発生した高い応力は、この事実に起因するものと考えられる。

10. 急速放電特性

コイル異常時には、その保護を目的として急性放電を行うが、この際に発生する高電圧や圧力上昇によってコイルに支障が起きないことを確認しておく必要がある。急速放電は通常、コイル中に一定値以上の常電導電圧が発生した場合に開始されるが、本実験では人

為的に電源とコイルの接続を切る方法によった。JA コイル及び EUコイル急速放電実験結果を Table 5 に比較して示す。同表に示すように、放電時の最大電圧は、JA コイルで 1 kV、EU コイルで 2.2kV であった。

急速放電時における JA コイル温度変化は、すでに本誌⁹⁾に報告した。その要点は、コイル巻線の高磁界部に主として温度上昇が見られ、その最大値は24Kであったが、このように常電導化した領域は狭く、その全ジュール発熱量は、急速放電によるパルス損失に比較すると十分小さいということであった。

一方、Fig. 14は急速放電時のEU コイル温度変化を示したものである。コイル容器の温度は、渦電流損失によって急速放電直後に最大 15~17K へ上昇している。巻線部での温度上昇は、容器より遅れて発生し、放電 20~30 分後に 6 ~ 7 K に達している。したがって、この温度上昇は、巻線自身での損失より容器からの熱伝達に支配されていると考えられる。

Table 5 Data of Fast Discharge Tests

	JA-LCT	EU-LCT
Discharged current	10. 2kA	10. 0kA
Discharged energy	106MJ	80MJ
Time constant	20sec	7sec
Max. terminal voltage	1. 0kV	2. 2kV
Total energy loss	1. 9MJ	1. 5MJ
Max. pressure increase	1. 2Bar	3. 9Bar
Max. conductor temp.	24K	8K
Number of dumps from rated current, 10kA	1	6

Fig. 14 Temperature of winding and coil case after fast discharge of the EU-coil.

急速放電時の全損失量について、JA コイルでは、コイル内液位の減少量から、また、EU コイルでは、コイル入口と出口のヘリウム・エンタルピー差にヘリウム流量を乗じて時間積分することによりそれぞれ測定し、Table 5 に示す結果を得た。JA コイルの導体は、Fig. 15 に示す $\dot{B}_p$ に対して低パルス損失となるよう設計されているため¹³⁾、自己放電による $\dot{B}_d$ に対しては損失が大きく測定値の 1.9MJ は設計どおりの値であった⁹⁾。また、設計上では全損失を構成する巻線部でのパルス損失とコイル容器での損失がほぼ等しいと考えられる。一方、EU コイルの導体は、Fig. 15 の $\dot{B}_d$ に対しても低パルス損失となるよう設計されたものであるが、導体製作上の問題¹⁴⁾のために、実際には設計値の 3 倍の損失が発生した。EU コイルでは急速放電損失の 1/3 が巻線中にて、残り 2/3 がコイル容器中にて発生したと考えられる¹⁵⁾。Table 5 に示した両コイルの放電条件は、放電開始電流値と定格電流値の比に相違があるためその補正を行うと、JA コイルの急速放電（時定数 20 s）と EU コイルの急速放電（時定数 7 s）での損失エネルギー量はほぼ同等と判断される。

急速放電時のヘリウムの流体的挙動としては、JA コイルの場合、実験手法上の考慮から、放電開始後、人為的にヘリウムを大気開放し、Fig. 16 に示すような圧力変化となった。一方、EU コイルでは、コイル入口圧力が 10bar に達した時点で、コイルから吐出するヘリウムを Fig. 5 で示したバッファ・タンクへ逃がすことにより、Fig. 16 に示すような変化となった。この方法によって EU コイルの場合、系内のヘリウムを大気中へまったく放出することなく、6 回の急速放電を行うことができた。

11. 安定性

JA コイルの安定性試験は本誌⁹⁾に報告されたよう

Fig. 15 Orientation of poloidal field and toroidal field changes for JA- and EU-conductor.

Fig. 16 Pressure increase during fast discharge.

に、巻線部最内周の導体をヒータ加熱することによって行われた。その主要結果は次のとおりであった。

- ①最大磁界部の 1/2 ターンを常電導化しても、約 1 s にて、超電導状態へ復帰した。
- ②また、常電導状態の life time が、その長さに依存しないことから、完全安定性が実証された。
- ③実験結果から推定される安定性限界は、7.9 T において、12.6 kA（定格の 123%）と考えられ、設計値¹⁶⁾の 12.8 kA（8 T）とよく対応している。

一方、EU コイルの安定性実験は、コイル入口部においてヘリウムをヒータ加熱する方法で行った。最適な方法は、導体の誘導加熱であったが、コイルの絶縁保持等の観点から誘導コイルの取付けは断念した。EU コイルについて行った安定性解析^{17), 18)}では、その安定性が、ノーマル領域の場所（磁界）、と長さ及び流体的条件に依存し、クエンチへ移行する場合には、3 s 後に、内部最大圧力が 50 bar に達すると計算されている。また、その安定度については、動作電流値及び温度に対する stekly parameter α を Fig. 17 に示す。後述するように、EU コイルの国内実験では入口温度を 6 K まで上昇させたが、この場合、ヘリウム流量（2.1 g/s channel）に対応する冷却熱流束値は 0.024 W/cm²・K で、 α 値は 24 に達する。また、ORNL

での総合実験の場合では、磁界は 8 T、電流値は11.4 kA へ上昇するが、温度が 3.8K へ下がること及び 10 g/s へとヘリウム流量が増大することによって、冷却熱流束値は0.11W/cm²・K まで上昇し、 α 値は3まで改善される。 α 値はまだ1よりかなり大きいため、Cold end recovery 特性を得るには至っていないが、LCT で予定されるパルス磁界印加による損失に対しては、十分な安定性を期待している。

この様に設計された EU コイルについて、安定性実験では、Fig. 8 に示したヒータに 500W を 1 s 間入力し、ヘリウム温度を 4.8K から 7.5K まで上昇させたが、コイル中にノーマル部を発生することはできなかった。この主な理由は、加熱されたヘリウムの大半がコイルへ入らずに、外部へ逆流したためと推定される。そこで、ヒータで長時間加熱し、コイル入口でのヘリウム温度を 5.7K 次に 6.0K へ上昇させたうえで、10kA からの急速放電を行ったが、やはり有意なノーマル部を発生することはできず、EU コイルの国内実験では結局ノーマル発生による安定性実験は行うことができなかった。

12. 結 論

JA コイルと EU コイルは、トカマク型装置を目的として開発が進められている大型超電導磁石につい

て、プール冷凍と強制冷凍という異なった手法の実験的比較を可能にした初めてのコイルである。原研及び KfK で自主的に行った二つの国内実験は、本来、米国オークリッジ国立研究所での総合実験に先立つ予備的な目的で企画されたものであるが、結果的には、これらの単独コイル実験からも、今後の開発作業の進め方

Fig. 17 Load lines of the TOSKA and the LCTF facility with I - and T -margins in the I_c/T_c -diagram.

Table 6 Comparison of Pool-boiling-cooled and Forced-flow-cooled coils

Meaning of Symbols	very good	●	±	△		
	good	○	bad	×		
					Pool-Cooled	Forced-Cooled
Simplicity of conductor design		○			○	×
Simplicity of winding design		△			△	○
Cost of conductor fabrication		○			○	×
Cost of winding fabrication		△			△	○
Expenses for quality assurance		○			○	×
Possibility of internal shorts		×			×	○
High-voltage performance		△			△	●
Vacuum tightness		△			△	○
Thermal efficiency during steady refrigeration		○			○	×
Stiffness of the winding		×			×	△
Possibility of internal disturbance		△			△	○
Stability against external heat input		○			○	○
Self-recovery from normal state		○			○	×
Pressure increase due to fast discharge		○			○	○
Reliability in case of cryogenic system down		○			○	○

を考えるにあたって重要な多くの技術情報を得ることができた。

本論文の主題であるプール冷凍型と強制冷凍型の比較について、6 LCT コイルのうち 2 個の比較をもって断定的な結論をくだすのは早計であるが、これまでに得られた実験結果に関する限り、Table 6 に示すような比較評価が可能である。

Table 6 の内容を総括すると次の二つのことが指摘できる。

①コイル・サイズ及び動作条件が LCT コイルと同等レベルまでのトカマク装置を、今直ちに建設するのであれば、プール冷凍方式の採用が適当と考えられる。その理由は、熱的に完全な安定性を有するコイル・システムが現在の技術で十分に保証でき、かつ建設費も強制冷凍方式より低くすることが可能なためである。

②一方、強制冷凍方式は、LCT コイルに比較して、はるかに大型かつ動作条件のきびしいトカマク装置を、将来建設する場合に有力な候補になると考えられる。強制冷凍方式の機械的安定性、高耐電圧性等は、信頼度の高い大型コイル・システムの建設にあたって重要となる。ただし、プール冷凍に比較して、複雑な冷凍システムが必要で、必然的に全体の熱効率も低下するため、これらの問題解決に向かって、今後技術開発を積み上げる必要がある。

今後、米国オークリッジ国立研究所での 6 コイル総合実験では、それぞれ、独自の創意と工夫によって製作された三つのプール冷凍コイルと三つの強制冷凍コイルが技術的に比較できる予定である。本論文で整理された比較の視点に立って、総合実験後により深い技術評価がまとめられると考えられる。

本論文のむすびにあたり、本作業に御鞭撻をいただいた KfK の Prof. Dr. W. Klose, 原研の森理事、磯所長、苫米地所長、田中部長、小幡部長に謝意を表します。また、LCT 計画の代えがたい推進者であられた安河内教授と Prof. W. Heinz がすでに他界されておられることは残念に堪えません。

本論文の出発点となった両コイルの国内実験は、原研及び KfK の超電導磁石研究室全員の努力によって実現され得たものであり、各位に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Technical Specification TS-14700-01, Superconducting Toroidal Field Coil, LARGE COIL PROGRAM, Revision E, Febr. 1980, ORNL, Oak Ridge TN, USA
- 2) S. Shimamoto et al.: Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research San Francisco (1979) 1174
- 3) S. Shimamoto et al.: Cryogenics **25** (1985) 539
- 4) H. Krauth et al.: Proc. 9th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research Chicago (1981) 2027
- 5) 奥野他: 低温工学 **19** (1984) 56
- 6) W. Herz et al.: Proc. 10th ICEC Helsinki (1984) 382
- 7) 多田他: 低温工学 **19** (1984) 83
- 8) W. Herz et al.: Proc. 10th ICEC Helsinki (1984) 83
- 9) 西他: 低温工学 **19** (1984) 93
- 10) W. Herz et al.: Testing of the Euratom LCT coil in the TOSKA facility Proc. 13th SOFT Varese (1984)
- 11) 小泉他: 低温工学 **19** (1984) 100
- 12) K. Yoshida et al.: Advances in Cryogenic Engineering Materials **28** (1982) 781
- 13) H. Tsuji et al.: IEEE Trans. **MAG-17** (1981) 42
- 14) C. Schmidt: IEEE Trans. **MAG-19** (1983) 707
- 15) W. Herz et al.: Results of the European LCT coil in the Toska Facility IEEE Trans. **MAG-21** (1985) 249
- 16) M. Nishi et al.: Journal de Physique **C1** (1984) 131
- 17) R. Ries: IEEE Trans. **MAG-17** (1981) 2097
- 18) G. Krafft et al.: Proc. 8th ICEC Genova (1980) 330