

先端的な精密計測のための
超電導及び極低温機器の開発

藤 平 潤 一

題目：先端的な精密計測のための超電導及び極低温機器の開発

専攻名：高信頼ものづくり専攻

指導教員：上原 弦

研究者名：藤平 潤一

目次

第 1 章	序 論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	研究の目的	3
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導マグネット 回転式伝導冷却装置の開発	7
2.1	緒言	7
2.2	酸化物超電導マグネット装置開発の背景	8
2.2.1	超電導	8
2.2.2	酸化物超電導	9
2.2.3	酸化物超電導機器の実用化への課題	12
2.3	磁気分離用 Bi-2223 酸化物超電導コイル	13
2.4	冷却システム熱設計	14
2.4.1	熱設計	14
2.4.2	電流リード最適設計	19
2.5	装置の構造	24
2.6	運転試験	29
2.6.1	垂直状態での冷却試験及び励磁試験	29

2.6.2	水平状態での冷却試験及び励磁試験	34
2.7	結言	39
	第 2 章参考文献	40
第 3 章	XMCD 計測用超高真空三軸ボア付伝導冷却型	
	YBCO ベクトルマグネット装置の開発	43
3.1	緒言	43
3.2	YBCO コイルの設計及び仕様	45
3.3	コイルユニット 1 の製作及び評価	52
3.3.1	コイルユニット 1 の製作	52
3.3.2	液体窒素浸漬での V - I 特性計測	56
3.3.3	冷凍機伝導冷却での電気抵抗計測	58
3.3.4	冷凍機伝導冷却での V - I 特性計測	59
3.3.5	冷凍機伝導冷却での一定時間通電試験	60
3.3.6	パラフィン含浸による効果	61
3.4	コイルユニット 2、3、4 の液体窒素浸漬での V - I 特性計測	62
3.5	YBCO コイルの応力解析	64
3.6	冷却システム熱設計	69
3.7	装置の構造	76
3.8	性能確認試験	79
3.8.1	YBCO コイル搭載前の冷却性能試験	80
3.8.2	完成した装置の冷却試験	81
3.8.3	完成した装置の励磁試験	82
3.9	XMCD 計測	88
3.10	コイルユニット焼損とその修復	90
3.10.1	焼損状況及び修復	90
3.10.2	修復後の試験	94
3.11	結言	96
	第 3 章参考文献	97

第 4 章 MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発 99

4.1	緒言	99
4.2	再凝縮サイクル設計	103
4.3	熱交換器設計	107
4.4	再凝縮器設計	113
4.5	装置の構造	115
4.6	単体再凝縮能力試験	116
4.7	再凝縮運転	119
4.8	磁気ノイズ計測	120
4.9	校正された MEG ファントムによる位置ずれ計測 .	122
4.10	聴性誘発脳磁計測	126
4.11	結言	130
	第 4 章参考文献	131

第 5 章 結論と今後の展望 133

5.1	結論	133
5.2	今後の展望	134

研究業績	136
----------------	-----

謝辞	143
--------------	-----

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

現在の社会情勢において、経済的な繁栄と引き換えに、エネルギーや資源の浪費などの問題が深刻化している。

エネルギーに関しては、日本において、2011 年 3 月 11 日に東日本大震災が発生し、この地震に伴って福島第一原子力発電所事故が起こった。これによって、現在、定期点検を含めて全ての原子力発電所が停止となっている。原子力発電の再稼働の議論と共に、将来に向けた次世代の発電やエネルギー、そして省電力化への施策や新技術の登場が期待されている。

そして資源に関しては、ニュースや新聞で報じられているように、現在、世界的なヘリウム需給の逼迫が大きな問題となっており、この危機的状況が今後も続くと思われる。また、ヘリウムは非常に軽いため、成層圏を抜けて宇宙に放出されてしまう不可逆な資源であり、将来的に枯渇するといわれている。

これらのエネルギーと省電力化、ヘリウム資源が大きなテーマとなっているのが極低温分野である。極低温とは、液体ヘリウム温度 4.2 K 以下の絶対零度に近い温度領域（広い意味では液体窒素温度 77 K 以下）のことを示す。極低温分野は、**Fig. 1.1** に示したように、極低温環境を作り出すための極低温技術とそれによって特性が得られる超電導技術で成り立っており、エネルギー、医療、輸送、通信などの多種多様な分野で研究・応用されている。その中でエネルギー・電力においては、超電導の利点を生かして、核融合発電や超電導発電機、フライホイール、超電導電力貯蔵 (SMES)、超電導送電ケーブルなど

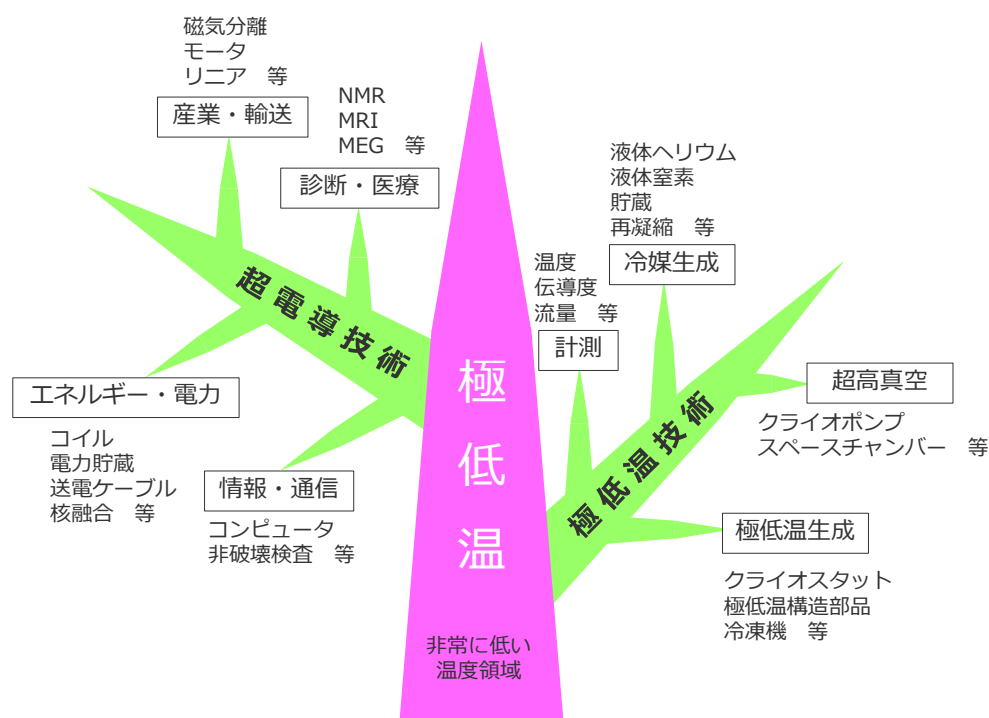


Fig. 1.1 Technologies and applications of cryogenics.

の開発が進められている。そして、超電導機器自体の小型化・省電力化を目指して、廉価な液体窒素や小型省電力冷凍機で運用可能な酸化物超電導への期待が大いに高まっているが、その脆弱性に対する懸念や技術構築がまだ浅いことから実用化があまり進んでおらず、これを前進させるための研究開発・技術構築が必要となっている。

また、極低温分野において最も必要不可欠な資源がヘリウムに他ならない。液体ヘリウムの大気圧での飽和温度は 4.2 K であり、極低温環境を作り出す冷媒として数多く使われている。各種極低温実験、上記のエネルギー・省電力機器、超電導マグネット、超電導リニア、MRI や脳磁計といった先進医療機器などの極低温・超電導に関わるものの多くに液体ヘリウムが用いられており、また、ガスとしても風船や飛行船、半導体や光ファイバーの製造、リーク検出などに利用されている。よって、ヘリウムが手に入らないということは、エネルギー、医療、産業など多くの分野で多大な損害が生じてしまう。そのため、ヘリウム需給問題の解決と資源の有効利用が急務となっている。

1.2 研究の目的

本研究では、極低温を大きな柱として、エネルギーとヘリウム資源の問題を解決すべく、酸化物超電導を用いた小型・省電力超電導機器の実用化と、酸化物超電導への置き換えが困難な超電導精密計測機器のためにノイズの少ない液体ヘリウムリサイクルの実現及びこのような機器へのノイズを評価する方法の確立を目的とした。

超電導機器で最も実用化されているのはマグネット装置である。その中でも、**Fig. 1.2 (a)** に示したような装置全体を回転させて磁場方向とアクセス方向を自在に変えることが出来る回転式金属超電導マグネット装置が数多く市販化されており、磁場を必要とする幅広い研究・産業分野で気軽に利用されている。この数多く利用されている回転式マグネット装置を、脆弱性に対する懸念から今までに例の無かった酸化物超電導で実現できれば、超電導機器の小型化・省電力化が大きく進むことが期待できる。そこで、磁気分離用高速励磁・減磁を目的として開発された室温ボア径 200 mm の大口径 Bi-2223 酸化物超電導コイルを用いて、冷凍機伝導冷却による回転式酸化物超電導マグネット装置の開発を行なう。これは、回転式のマグネット装置に酸化物超電導を用いる初めての例である。磁気分離とは、磁気力で磁性体や磁性体を吸着させた物質を分離する技術であり、下水や廃液の浄化、環境ホルモンの除去に役立つことで注目を受けている。この装置を用いることで、磁気分離用途の拡大、処理方法の確立と能力向上のために、垂直から水平までの様々な方向での磁気分離に対応可能となる。

次に、回転式酸化物超電導マグネット装置の発展型として、**Fig. 1.2 (b)** に示したように、装置を回転させることなく、磁場方向だけを自在に変えることが出来る磁場方向可変酸化物超電導マグネット装置の開発を行なう。これも冷凍機による伝導冷却方式とする。方向可変磁場発生コイルは、4 個のコイルユニットで構成された二軸スプリットコイル構造とする。これは、酸化物超電導を用いた初の磁場方向可変マグネット装置である。この装置は、1 T 以上の方向可変磁場への

ニーズが高まっている軟 X 線磁気円二色性（X-ray Magnetic Circular Dichroism : XMCD）計測装置として適用する。XMCD とは、省エネルギー化を推進していくためのエネルギー機器の高性能化に必要な磁性材料の磁気特性を評価するために適した手法である。

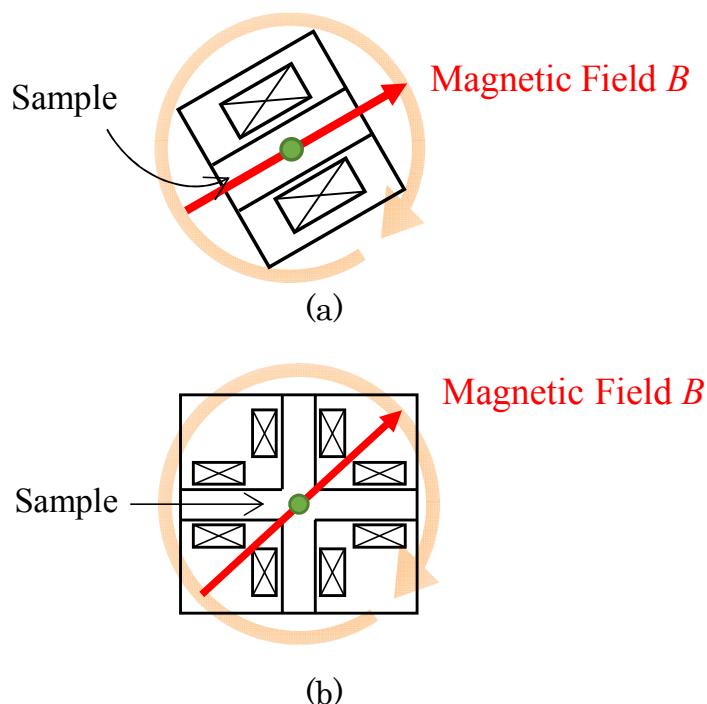


Fig. 1.2 Schematic diagram of (a) rotatable and (b) vector superconducting magnet systems. The former can change the magnetic field direction by rotating the whole system, and the latter can generate the rotatable magnetic field by biaxial split coils in the system.

そして、ヘリウム資源の問題を解決するために、超電導精密計測機器のひとつである脳磁計（MEG）を対象とした MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なう。**Fig. 1.3** に模式図を示す。これは、高い液体ヘリウム再凝縮能力と低ノイズを目的として、再凝縮した液体ヘリウムをヘリウムコンテナに貯蔵して、そのコンテナを介して MEG に供給する装置である。また、今まで報告されていなかった装置設計の詳細を明らかにする。液体ヘリウムの再凝縮は、MRI 等の強磁場機器において既に実用化されているが、超電導精密計測機器においてはノイズの観点から実用化の例が少ない。そして、装置

運転時の MEG への影響を評価するために、ユーザー視点に立ったノイズ評価方法を提案して、開発した装置の有用性についてより詳細に評価する。

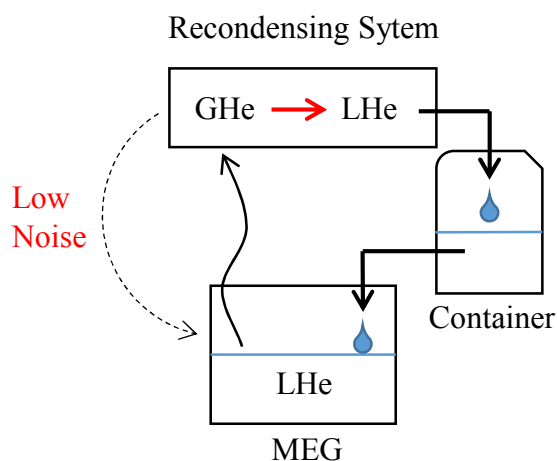


Fig. 1.3 Schematic diagram of the liquid helium recondensing system for MEG.

1.3 本論文の構成

本論文は、以下の章より構成される。

- 第 1 章 序論
- 第 2 章 磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導マグネット
回転式伝導冷却装置の開発
- 第 3 章 XMCD 計測用超高真空三軸ボア付伝導冷却型 YBCO
ベクトルマグネット装置の開発
- 第 4 章 MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発
- 第 5 章 結論と今後の展望

第 1 章では、エネルギーとヘリウム資源の問題に対する極低温分野の役割について述べる。その中で、省電力化のために実用化が期待

される酸化物超電導の課題と不可逆な資源であるヘリウムの逼迫した状況について述べ、本論文の目的を示す。

第 2 章では、回転式酸化物超電導マグネット装置として、磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導マグネット回転式伝導冷却装置の開発について述べる。酸化物超電導の脆弱性を考慮した機械設計を行ない、これに伴う熱負荷の設計を行なう。通電試験を行ない、水平方向と垂直方向と両方で所望の励磁が可能であることを確認し、回転機構を有する酸化物超電導マグネット装置の実現性を確認する。

第 3 章では、方向磁場可変酸化物超電導マグネット装置として、XMCD 計測用超高真空三軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置の開発について述べる。磁場発生用コイルは、YBCO 酸化物超電導テープ線材を用いてテーパー状としたコイルユニット 4 個で構成された二軸スプリットコイル構造とする。運転試験を行ない、1 T 以上の方向可変磁場を発生可能なことを確認する。そして、本装置を用いて新規 XMCD 計測を行ない、本装置の XMCD 計測への有用性を確認する。

第 4 章では、MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なう。必要な再凝縮能力を設定して、再凝縮サイクル、熱交換器と再凝縮器の設計を行なう。カロリメーター方式を用いた本装置の能力試験とヘリウムコンテナに接続した時の再凝縮率計測を行ない、所定の能力を有することを確認する。MEG に対する従来のノイズ評価方法に加えて、新たな 2 つの評価方法を提案してそれを実行して、正常に MEG 計測が可能であることを確認する。これにより、分離供給方式の本装置が MEG と両立性を有することを示す。

第 5 章では、本研究で得た結論とそれぞれ開発した装置の今後の展望について述べる。

第 2 章

磁気分離用大口徑 Bi-2223 酸化物 超電導マグネット回転式伝導冷却装置 の開発

2.1 緒言

超電導マグネットの応用技術の一つとして、磁気分離があるが、これは磁気力によって混合物や媒質から目的の磁性体もしくは磁性体を吸着させた粒子を選択的に分離する方法である。磁気分離の用途としては、下水や廃液の浄化¹⁾⁻³⁾、磁気クロマトグラフィー⁴⁾、放射性物質汚染土壌減容化⁵⁾、医薬用タンパク質の分離精製⁶⁾などへの応用がある。

磁気分離効率を高めるには、磁気力を大きくする、つまり磁場と磁場勾配を大きくする必要がある。そのために小型、省電力で強力な磁場が発生可能な超電導マグネットを用いることが有効であり、様々な磁気分離の分野で超電導化が進められている。

磁気分離用マグネットには、高磁場、高磁場勾配と、分離した物質を効率よく磁場環境から脱離するために高速励磁・減磁の性能が求められる。近年の酸化物超電導線材料の研究開発技術の発展により、実用段階となっている酸化物超電導コイルは、高い臨界温度を有しているため、励磁中の温度上昇に対して臨界温度までのマージンが大きく、高速励磁に適している。そこで、Bi-2223 酸化物超電導線を用いて高速励磁が可能な磁気分離用 Bi-2223 酸化物超電導マグネット装置が開発された⁷⁾⁻¹⁰⁾。この装置は、室温ボア径 200 mm の大口徑

Bi-2223 酸化物超電導コイルが水平に配置されており、20 K-GM 冷凍機で伝導冷却される。コイル中心の磁場方向は水平であるため、磁気分離対象を水平に移動させて磁気分離を行なう。この装置を用いてヒ素や環境ホルモン除去の研究が進められてきた^{11), 12)}。

研究を進めていく中で、磁気分離対象を落下もしくは上昇させて行う磁気分離や、磁場が火や煙の上昇に与える影響についての検討、落下する導電性－非導電性球状物質をローレンツ力によって分離させる実験を目的として、Bi-2223 酸化物超電導コイルを水平方向から垂直方向まで回転させて任意の方向に磁場を発生できる 90° 回転式の冷凍機伝導冷却装置の開発を行なった。開発した装置について、垂直方向と水平方向状態で冷却・通電運転を行なった。

2.2 酸化物超電導マグネット装置開発の背景

ここで、酸化物超電導マグネット装置開発にあたり、超電導と酸化物超電導及び酸化物超電導機器実用化への課題について述べる。

2.2.1 超電導

超電導の基本的特性として、(1) 材料によって異なる臨界温度 T_c で電気抵抗が零になること、(2) 超電導状態では、外部磁束が全く侵入せずに外部に押し出される完全反磁性を有することである（マイスナー効果）。Table. 2.1 に主な超電導体の常圧下での臨界温度 T_c を示す¹⁻⁴⁾。(2) の完全反磁性について、外部磁束に対する現象の違いから第一種超電導体と第二種超電導体に分類される。前者は、超電導状態が破壊される臨界磁場 H_c を境にして、完全反磁性である超電導状態と磁束が完全に侵入してしまう常電導状態が明確に分かれている。超電導となる金属元素の殆どがこちらに属する。そして後者は、外部磁場を強めていく過程で、下部臨界磁場 H_{c1} と上部臨界磁場 H_{c2}

の 2 段階で超電導から常伝導へ転移する。 H_{c1} 以下では完全反磁性であり、 $H_{c1} \sim H_{c2}$ では内部歪みや不純物に磁束が侵入しているが、超電導状態のまま超電導と常伝導が共存している状態である。そして、 H_{c2} 以上で常電導状態となる。金属元素としてはニオブウムとバナジウムがこれに含まれ、超電導となる合金及び高温超電導体（酸化物超電導体を含む）もこちらに属する。これらは、第一種超電導体と比較して臨界磁場が高く、その利点から超電導応用機器に用いられる。

超電導の応用においては、MRI（医療用核磁気共鳴画像撮影：Magnetic Resonance Imaging）、SQUID（超電導量子干渉素子：Superconducting QUantum Interference Device）、超電導送電、超電導リニアなどへの実用化もしくは実用段階にあるものを含めて、様々な研究開発が進められている。

2.2.2 酸化物超電導

酸化物超電導の最大の利点は、液体窒素温度 77 K 以上の超電導転移温度を有するということである。これにより、高価な液体ヘリウムや 4 K 冷凍機に代わって、廉価な液体窒素や省電力冷凍機で運用可能な超電導機器の実用化が期待されてきた。しかし、酸化物超電導は金属超電導に比べて脆弱であり、加工の困難さなどからなかなか実用化には至らなかった。しかし、近年の技術の進歩によって様々な形状・仕様の酸化物超電導体（バルク体、長尺線材、薄膜等）が開発・製品化されてきており、それらを用いた超電導機器の研究開発が進められている。**Table. 2.2** に、主な酸化物超電導材料形状とその応用例（開発段階も含む）を示す。線材については、高強度、高臨界電流特性を有する線材が開発・製品化されるようになったことにより、それを用いた様々な酸化物超電導機器の開発が進められている。近年では、省電力化を目的とした酸化物超電導送電ケーブル、小型化・省電力化を目的とした酸化物超電導マグネット式の超電導リニアの開発、最内層コイルを酸化物超電導コイルにして、金属超電導では成し

得なかった強磁場マグネットや 1GHz 級の NMR マグネットの開発などが進められている。

Table. 2.1 Transition temperature of superconducting materials at 0.1 MPa ¹³⁻¹⁶⁾

Large category	Small category	Fomula	T_c [K]
Superconductive metals	Element	Al	1.19
		In	3.41
		Sn	3.72
		Hg- α	4.15
		V	5.3
		Pb	7.18
		Nb	9.2
	Alloy	Nb-Ti	9.9
	Compound	Nb ₃ Sn	18
		MgB ₂	39
Cuprate superconductors	Bi-based	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ Bi-2212	90
		Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ Bi-2223	110
	Rare earth-based	YBa ₂ Cu ₃ O ₇	93 ¹⁵⁾
	Hg-based	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133.5 ¹⁶⁾
Iron-based superconductor	—	SmFeAs (O _{1-x} F _x)	55

Table. 2.2 Application example using cuprate superconductor

Configuration of cuprate superconductor	Applications
Bulk material	▪ Magnetic separation ▪ Drug delivery system ▪ Flywheel ▪ Mixer ▪ Power Lead
Wire	▪ Coil ▪ NMR ▪ MRI ▪ Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES) ▪ Superconducting Magnetic Levitation Railway ▪ Superconducting Power Transmission ▪ Motor ▪ Power Lead ▪ • • • etc. ※Applications to many kinds of superconducting magnet system have been studied.
Thin film	▪ SQUID ▪ Josephson computer ▪ Fault current limiter ▪ Filter ▪ Wire

2.2.3 酸化物超電導機器の実用化への課題

前項で、酸化物超電導の実用化へ向けた研究・開発が進められていることを述べたが、近年の液体ヘリウム需給の逼迫や価格の高騰など深刻な状況であるため、液体窒素を使用して超電導を達成できる酸化物超電導への期待は、より一層高まっている。このような期待の高まりもあり、数多くの技術が確立されてきているが、実用化に至っているケースはまだ数少ない。

応用例の一つとして挙げた酸化物超電導マグネットについて見ると、現在、マグネット開発に多く使用されている線材は、ビスマス系酸化物超電導線材（以後 Bi 系線材）やイットリウム系酸化物超電導線材（以後 Y 系線材）である。両方の線材ともテープ状導体であるが、Bi 系線材は一般的に銀シースに材料粉末を充填して熱処理、圧延する PIT（Powder In Tube）法で作成されており、機械的強度を向上させるために多芯線化されている。そのため、実用的な曲げを与えても、性能の低下がないとされている¹⁷⁾。一方、Y 系線材は超電導層、銅層、ハステロイ層等を重ねた多層構造であり、線方向に強いが、幅方向には非常に弱いという点から、熱収縮や応力によって超電導層の剥離が生じて特性劣化する可能性がある。しかし、Y 系線材は Bi 系線材に比べて、高磁場中での臨界電流が高く、高温域（30 K 等）において磁場異方性が Bi 系線材に比べて小さい、また、最小巻直径が Bi 系線材と比べて小さくできるため（カタログ比較）に小型化に適しているという利点がある。

両方の線材共に臨界電流、強度の改善が進められており、コイル化が可能なレベルとなってきた。しかし、様々な研究成果から、今まで培われてきた金属系超電導コイルの技術をそのまま適用できるわけではなく、酸化物超電導コイルという新たなジャンルでの技術の確立が必要であることが分かってきている¹⁸⁾。

また、酸化物超電導コイルの実用化を向けての障害の一つが価格であった。製品化当初の線材 1 m 当たりの価格は、金属系超電導として一般的な NbTi 線に比べて、10 倍以上であった。しかし、開発企

業の技術向上によって、2015 年には当初の半分ほどになる見込みであり、今後、Bi 系線材は線材断面積の最適化による銀使用量の低減、Y 系線材は成膜プロセスの高速化や簡素化による設備コストの低減により、更なる低コスト化が期待されている²⁾。

2.3 磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導コイル

ここで、本研究で用いた磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導コイル⁷⁾⁻¹⁰⁾について述べる。このコイルは 42 個の Bi-2223 ダブルパンケーキコイルで構成されており、使用した Bi-2223 酸化物超電導テープ線材は幅 3.7 mm、厚み 0.24 mm で、61 芯のマルチフィラメント構造で銀被覆されている。それぞれのダブルパンケーキコイルは、この超電導テープ線材を 3 層に重ねてポリミドテープと共巻きして R&W (React and Winding) 法より製作された。ダブルパンケーキコイル 1 個当たりのテープ線材の長さは約 200 m で、コイルで使用されたトータル長さは 8429 m となる。コイル最外層には板厚 0.1 mm 補強用のステンレステープが巻かれている。パンケーキコイルの積層間には 18 枚の銅均熱板が挟まれており、これと冷凍機を連結させてコイルを直接伝導冷却する。コイルサイズは、ボビン内径 240 mm、外径 306 mm 及び全長 352 mm である。このボビン内径に対して、室温ボア径は 200 mm と、かなり大きな口径となる。これがこのコイルの特徴であり、磁気分離の高効率化のために高磁場領域が広く、1 T 以上の磁界空間が $\phi 200 \text{ mm-L}200 \text{ mm}$ (約 11 L) となる。通電速度 3 A/s で、180 A で中心磁場 1.7 T を発生することが可能で、自己インダクタンスは 1.6 H となる。そして、既存装置における繰り返し通電時のマグネットの飽和温度は 35~38 K である。

このコイルは、水平方向に設置するように製作されたもので、回転による歪みや振動に対する対策はとられていない。また、酸化物超電導は大変脆い材料である。本研究では、回転時にコイルの劣化や破損が発生しないように支持機構や補強治具を設けることとした。ただし、支持機構を頑丈にするとコイルへの熱負荷は増加するため、支持

機構の強度と熱負荷のバランスも検討した。

2.4 冷却システム熱設計

2.4.1 熱設計

既存マグネット装置で使用していた 2 段式 GM 冷凍機が、新規の冷却装置でも使用可能かを判断するために熱設計を行なった。既存冷凍機の商用電源周波数 50 Hz での冷却能力は、1st ステージ 80 K で 50 W 、2nd ステージ 20 K で 15 W であった。

Fig. 2.1 に、冷却装置の模式図と発生する熱負荷を示す。本装置は回転機構を有しており、回転移動による Bi-2223 の破損、劣化が無いように、コイル支持サポートを上下 4 本ずつ設置することとした。

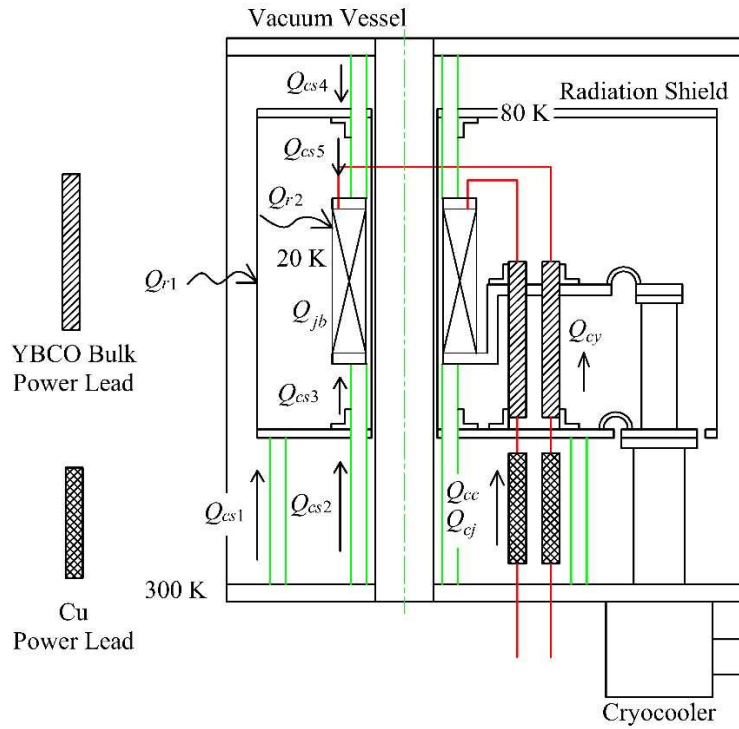


Fig. 2.1 Thermal design of the rotary Bi-2223 magnet cryocooling system.

また、室温－輻射シールド間電流リードは銅製電流リードとして、輻射シールド－Bi-2223 コイル間の電流リードは 250 A 仕様 YBCO バルク超電導製電流リードとした。装置に対する熱負荷は以下となる。

- ・ サポートからの熱伝導 (Q_{cs1} 、 Q_{cs2} 、 Q_{cs3} 、 Q_{cs4} 、 Q_{cs5})
- ・ YBCO バルク超電導製電流リードからの熱伝導
及びジュール熱 (Q_{cy})
- ・ 輻射熱 (Q_{r1} 、 Q_{r2})
- ・ 銅製電流リードの熱伝導 (Q_{cc}) とジュール発熱 (Q_{cj})
- ・ Bi-2223 コイルのハンダ接続部のジュール発熱 (Q_{jb})

なお、本装置は真空断熱構造のため、空気を介した冷却部への熱伝達を 0 W とした。また、超電導部の電気抵抗を 0 Ω とした。また、本コイルは外部製作品のため、 Q_{jb} に関する詳細は不明であった。

まず、熱伝導の計算を行なった。熱伝導は以下の式で与えられる。

$$Q_c = \frac{A}{L} \int_{T_b}^{T_a} k dT \quad (2-1)$$

ここで、 Q_c は熱伝導、 A は断面積、 L は長さ、 T_a は高温側温度、 T_b は低温側温度及び k は熱伝導率である。また、各構造材料の熱伝導積分値を **Table. 2.3** に示す。そして、温度条件として室温を 300 K、輻射シールド（冷凍機 1st ステージ連結）を 80 K、Bi-2223 コイル（冷凍機 2nd ステージ連結）を 20 K とした。

Table. 2.3 Value of integral of thermal conduction¹⁹⁾

	$\int_{4.2K}^T k dT$ [W/m]		
T [K]	Electrolytic Copper	SUS	GFRP
20	14000	16.3	1.44
60	58700	198	6.51
80	70700	349	9.95
300	162000	3060	103.1

輻射シールドへの総熱伝導 Q_{c1} は、輻射シールドを支持するサポートパイプ 4 本(Q_{cs1})と Bi-2223 コイルを支持する下部サポートパイプ 4 本(Q_{cs2})及び上部サポートパイプ 4 本(Q_{cs4})からとなる。そして、Bi-2223 コイルへの総熱伝導 Q_{c2} は、Bi-2223 コイルを支持する下部サポートパイプ 4 本(Q_{cs3})、上部サポートパイプ 4 本(Q_{cs5})及び YBC バルク超電導製電流リード (ジュール熱含む) (Q_{cy})からとなる。そして、各構造体の仕様と (2-1)式及び **Table. 2.3** を用いて算出した熱伝導計算値を **Table. 2.4** に示す。なお、YBCO バルク超電導製電流リードの熱熱伝導は、カタログに記載された 77 K–4.2 K 間での値を用いた。なお、この値は、カタログ上、熱伝導とジュール熱の和だが、便宜上、熱伝導として使用した。

Table. 2.4 Calculated heat conduction of Instruments in the Bi-2223 magnet system

	Material	Specifications of cross section	Length between 300 and 80 K [mm]	Length between 80 and 20 K [mm]	Number	Calculated heat conduction Q
Support for radiation shield	GFRP	Pipe ϕ 32-28	70		4	(300-80 K) Q_{cs1} 1.0 W
Bottom support for Bi-2223 coil	GFRP	Pipe ϕ 49-35	87	73	4	(300-80 K) Q_{cs2} 4.0 W
						(80-20 K) Q_{cs3} 0.43 W
Top support for Bi-2223 coil	GFRP	Pipe ϕ 40-30	78	57	4	(300-80 K) Q_{cs4} 2.6 W
						(80-20 K) Q_{cs5} 0.33 W
YBCO Bulk Current Lead	YBCO Bulk Conductor and GFRP	Plate 8×24		80	2	(80-20 K) Q_{cy} 0.16 W (Value shown in Catalog)

表より、輻射シールド(60 K)への熱伝導計算値 Q_{c1} と Bi-2223 コイル(20 K)への熱伝導計算値 Q_{c2} はそれぞれ以下の通りとなった。

$$Q_{c1} = Q_{cs1} + Q_{cs2} + Q_{cs4} = 1.0 + 4.0 + 2.6 = 7.6 \text{ W}$$

$$Q_{c2} = Q_{cs3} + Q_{cs5} + Q_{cy} = 0.43 + 0.33 + 0.16 = 0.92 \text{ W}$$

次に輻射熱の計算を行なった。輻射熱は以下の式で与えられる。

$$Q_r = \varepsilon S \sigma (T_{a2}^4 - T_{b2}^4) \quad (2-2)$$

ここで、 Q_r は輻射熱、 ε は輻射率、 S は受熱面積、 σ はステファン・ボルツマン係数、 T_{a2} は高温側温度及び T_{b2} は低温側受熱面温度である。温度条件は、熱伝導計算での条件と同様に輻射シールドを 80 K、Bi-2223 コイルを 20 K として、輻射シールドは 30 層の断熱輻射材で覆われているとした。輻射シールドの寸法を直径 650 mm、高さ 560 mm の円筒とした。また、Bi-2223 コイルの内側に直径 220 mm の輻射シールドパイプを設置することとした。Bi-2223 コイルの寸法は、ボビン内径 230 mm、外径 350 mm 及び全長 350 mm である。この条件と(2-2)式より、輻射シールドへの輻射熱計算値 Q_{r1} と Bi-2223 コイルへの輻射熱計算値 Q_{r2} は以下のとおりとなった。

$$Q_{r1} = 7.4 \text{ W}$$

$$Q_{r2} = 0.06 \text{ W}$$

2.4.2 電流リード最適設計

本装置の銅製電流リードから輻射シールドへの熱負荷は、周囲が断熱真空で外部との熱のやり取りが無いので、室温からの熱伝導と通電時のジュール発熱のみとなる。これらについては、電流リードの断面積を大きくすると発熱は減るが熱伝導は増える。また、長さを長くすると熱伝導は減るが発熱が増加する。そのため、2つの熱負荷のバランスをとって、その総和が最小になるような断面積と長さを有する電流リードの選定が必要となる。本節では、熱負荷が最小となる電流リードの最適設計について述べる。**Fig. 2.2** に外部との熱のやり取りが無い場合の電流リード最適設計の模式図を示す。図中の記号は以下の通りである。

I	: 電流	[A]
T_{a3}	: 高温側温度	[K]
T_{b3}	: 低温側温度	[K]
q_{in}	: 入口側熱流束	[W/m ²]
q_{out}	: 出口側熱流束	[W/m ²]
q_j	: ジュール発熱の熱流束	[W/m ²]
Q_a	: リード線流入総熱量	[W]
S	: リード線断面積	[m ²]
L	: リード線長	[m]
k	: リードの熱伝導率	[W/mK]
ρ	: リードの比抵抗	[Ω /m]

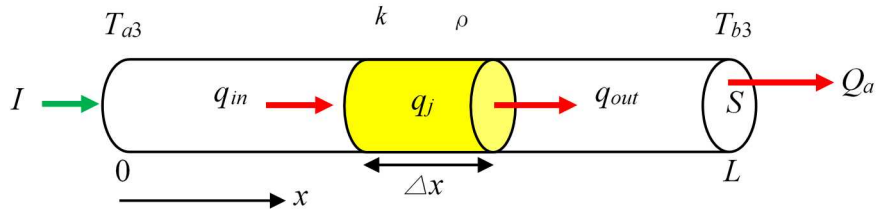


Fig. 2.2 Optimized design of a power lead in the case that the lead does not have any external heat exchange.

境界条件

$x=0$ の時 $T=T_{a3}$

$x=L$ の時 $T=T_{b3}$

q_{in} 、 q_{out} 及び q_j は以下の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} q_{in} &= -k \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \\ q_{out} &= -k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+\Delta x} \\ q_j &= \left(\frac{\rho I^2}{S^2} \right) \Delta x \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

定常状態での熱流束の関係式は以下で与えられる。

$$q_{in} + q_j = q_{out} \quad (2-4)$$

よって、(2-3)式と(2-4)式より以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} -k \left(\frac{dT}{dx} \right)_x + \left(\frac{\rho I^2}{S^2} \right) \Delta x &= -k \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+\Delta x} \\ \therefore k \left\{ \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+\Delta x} - \left(\frac{dT}{dx} \right)_x \right\} + \left(\frac{\rho I^2}{S^2} \right) \Delta x &= 0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

ここで、

$$f_{x+\Delta x} - f_x = \frac{df(x)}{dx} \Delta x$$

なので、(2-5)式は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} k \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) \Delta x + \left(\frac{\rho I^2}{S^2} \right) \Delta x &= 0 \\ k \frac{d}{dx} \left(\frac{dT}{dx} \right) + \left(\frac{\rho I^2}{S^2} \right) &= 0 \end{aligned}$$

$$T(x) = -\left(\frac{\rho I^2}{2kS^2}\right)x^2 + Ax + B \quad (2-6)$$

※A と B は定数

そして、前述の境界条件より (2-6)式は以下の通りとなる。

$$T(x) = -\left(\frac{\rho I^2}{2kS^2}\right)x^2 + \left(\frac{\rho I^2 L}{2kS^2} - \frac{T_{a3}-T_{b3}}{L}\right)x + T_{a3} \quad (2-7)$$

ここで、 Q_a は以下の式で与えられる。

$$Q_a = -kS \left(\frac{dT}{dx}\right)_L \quad (2-8)$$

よって、(2-7)式及び(2-8)式より Q_a は以下の通りとなる。

$$Q_a = \frac{\rho I^2}{2} \left(\frac{S}{L}\right)^{-1} + (T_{a3} - T_{b3})k \left(\frac{S}{L}\right) \quad (2-9)$$

(2-9)式の右辺第 1 項はジュール発熱を示しており、第 2 項は熱伝導を示していることが分かる。そして、 Q_a は S/L の関数であり、 $dQ_a/d(S/L)=0$ として Q_a が最小となる S/L を導き出せば、熱量が最小となる電流リードの寸法を選定することが出来る。よって、(2-9)式より

$$\begin{aligned} \frac{dQ_a}{d\left(\frac{S}{L}\right)} &= -\frac{\rho I^2}{2} \left(\frac{S}{L}\right)^{-2} + (T_{a3} - T_{b3})k = 0 \\ \therefore \frac{S}{L} &= \sqrt{\frac{\rho I^2}{2(T_{a3}-T_{b3})k}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

上記で得られた式を用いて、銅製電流リードの最適設計を行なった。
本装置の銅製電流リード条件は以下のとおりである。

材質 : 銅
 I : 180 A
 T_{a3} : 300 K
 T_{b3} : 80 K
 k : 400 W/mK
 ρ : $1.3 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}$

なお、熱伝導率と比抵抗は温度依存の物性値だが、計算の簡便化のために、中間温度での物性値を使用した。

上記の電流リード条件と(2-10)式から最小熱量となる S/L は

$$\frac{S}{L} = 4.9 \times 10^{-5} \text{ [m]}$$

となった。この結果から、銅製電流リードの断面積 S を 19.4 mm^2 、長さ L を 400 mm とした。そして、180 A 通電時に銅製電流リードに発生する熱量は、(2-9)式、銅製電流リード条件及び S/L の計算結果から 8.7 W となった。本装置に使用する銅製電流リードは 2 本であり、両方のリードに通電されるので、銅製電流リードの総熱量($Q_{cc}+Q_{cj}$)は 17.4 W となる。

以上より、80 K の輻射シールドの総熱負荷計算値 Q_{h1} と 20 K の Bi-2223 コイルの総熱負荷計算値 Q_{h2} は以下の通りとなった。

$$Q_{h1} = Q_{c1} + Q_{r1} + (Q_{cc} + Q_{cj}) = 7.6 + 7.4 + 17.4 = 32.4 \text{ W}$$

$$Q_{h2} = Q_{c2} + Q_{r2} + Q_{jb} = 0.92 + 0.06 + Q_{jb} = 0.98 + Q_{jb} \text{ W}$$

この結果より、安全率を 3 割として 1st ステージへの総熱負荷を 42.1 W 、2nd ステージへの総熱負荷を $(1.27 + Q_{jb}) \times 1.3 \text{ W}$ とした。これより、輻射シールドへの熱負荷は、既存冷凍機の 1st ステージの冷却能力範囲内であることを確認した。

一方、前述したように、Bi-2223 コイル自体の発熱 Q_{jb} が分からない状況であったが、その冷却に 13.73 W の能力を割り当てることが出来るため、冷却は十分可能であると予想した。結論として、新規冷却装置でも既存の 2 段式冷凍機が使えることが分かった。**Fig. 2.3** に熱負荷の計算結果、熱流入経路及び冷凍機の冷凍能力を記載した本装置の模式図を示す。各熱負荷は、冷却ステージを通して冷凍機の各ステージに吸収される。

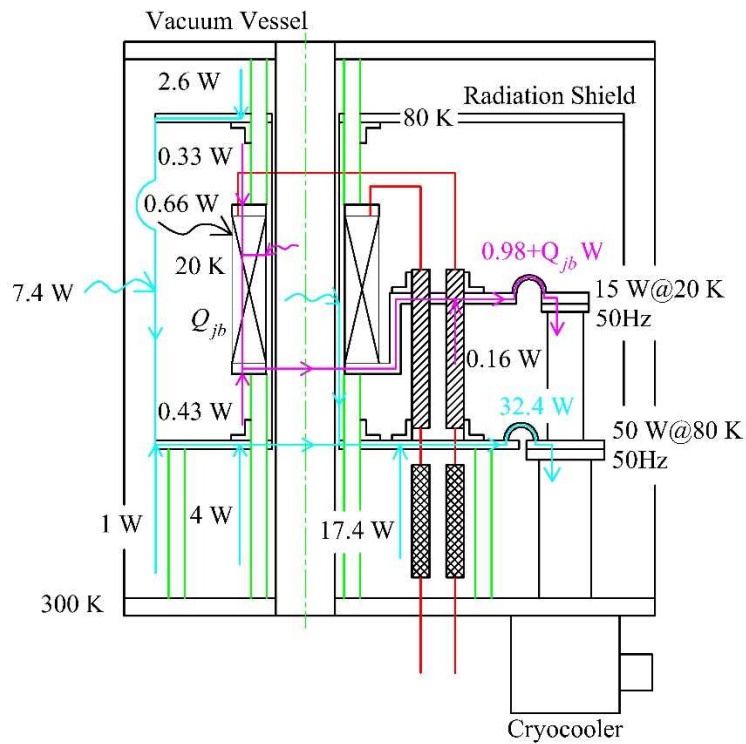


Fig. 2.3 Calculated heat loads through the rotary Bi-2223 magnet cryocooling system.

2.5 装置の構造

回転式マグネット装置の概略図を **Fig. 2.4**、回転模式図を **Fig. 2.5**、そして外観写真を **Fig. 2.6** に示す。室温ボア径は既存装置と同じ 200 mm とした。回転機構による手動操作で、垂直から水平へ、水平から垂直へ 90 度回転させることが可能である。地面からマグネット中心までの高さは、水平状態で 809 mm、垂直状態で 839 mm とした。また、コイル設置時の内部写真を **Fig. 2.7** に示す。Bi-2223 コイルのパンケーキコイル積層間にある 18 枚の銅均熱板と冷凍機の 2nd ステージが、熱収縮による歪みを軽減するために、アルミ製板バネを介して連結される。YBCO バルク超電導製電流リードの端部は、各ステージで電気絶縁材を介して冷却される。特に高温端（輻射シールド側）は、熱収縮による歪みを軽減するために、無酸素銅網線を介して輻射シールドに固定される。Bi-2223 コイルは、回転移動による破損、劣化が無いように、コイル上下に設けられた GFRP 製支持サポート（上下 4 本ずつ）によって真空層に固定されるが、安全のために CFRP 製引っ張りジグを追加で設けて、これによっても Bi-2223 コイルを固定するようにした。そして、**Fig. 2.8** に示したように、Bi-2223 コイルの口出し線が回転時に振動によって劣化しないように GFRP 板で補強して隙間に接着剤を充填した。この補強箇所の熱収縮による歪みは、口出し線と YBCO バルク超電導製電流リード低温端の間に設置した銅リードをフレキシブルにすることによって吸収する。

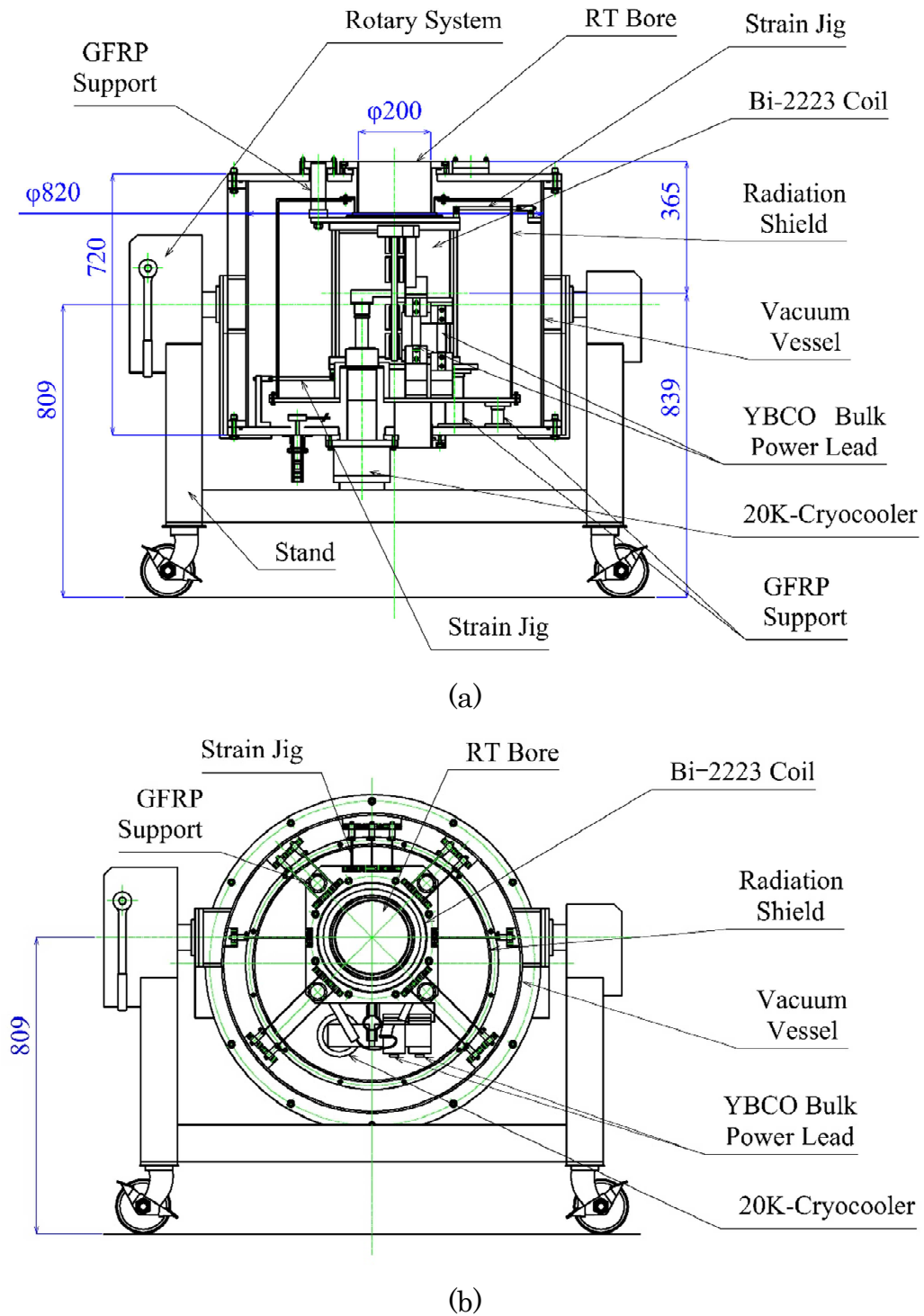


Fig. 2.4 A schematic cross section of (a) vertical and (b) horizontal position of the rotary Bi-2223 magnet cryocooling system. The Bi-2223 coil is installed in the system.

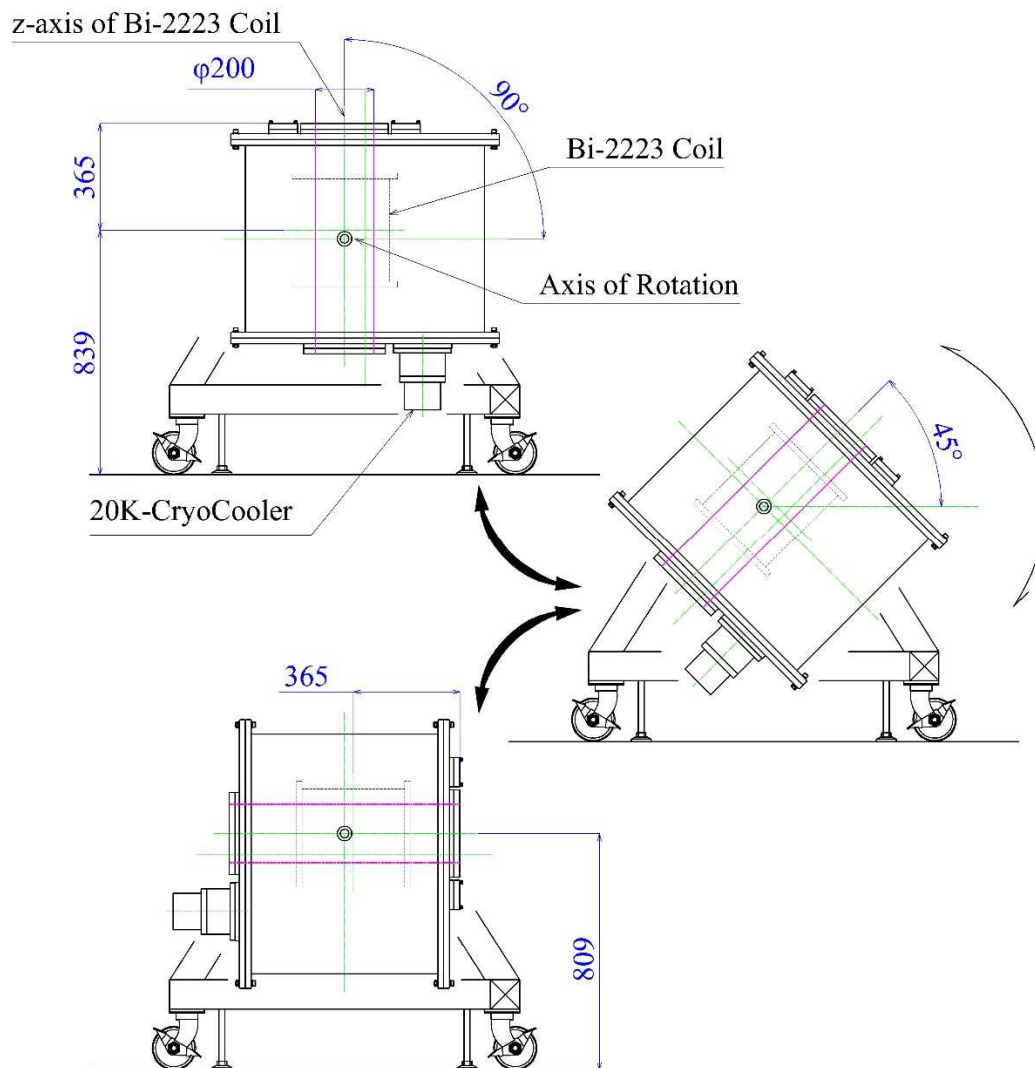


Fig. 2.5 An illustration of rotary simulation of the system. Each situation at an angle of 0° , 45° , 90° is exhibited.



(a)



(b)

Fig. 2.6 Photographs of (a) vertical and (b) horizontal position of the rotary Bi-2223 magnet cryocooling system. The Bi-2223 coil is installed in the system.

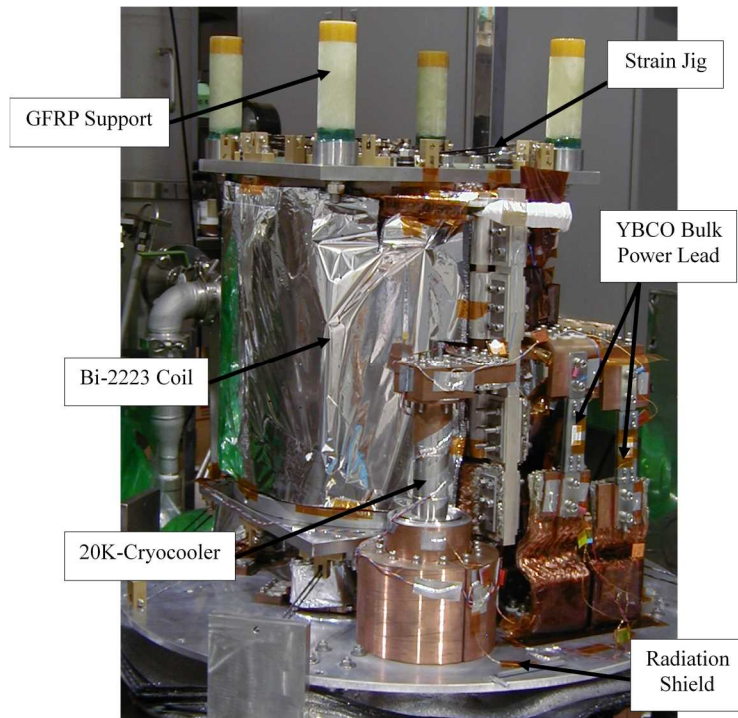


Fig. 2.7 A Photograph of the Bi-2223 coil installed in the system.

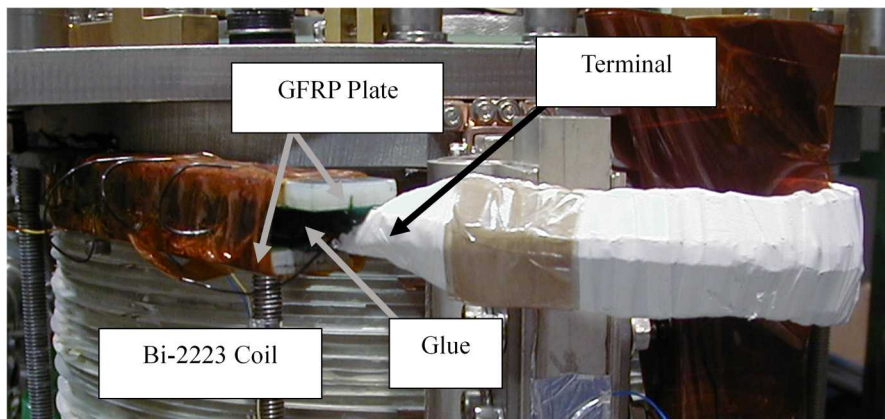


Fig. 2.8 A Photograph of the reinforced terminal of Bi-2223 coil.

2.6 運転試験

本項では、Bi-2223 コイルを搭載した本装置について、冷却が十分にできるか、あるいは異常電圧の発生もしくはクエンチ等の問題がなく運転が可能であることを確認するために、垂直状態と水平状態で冷却・通電試験を行なった。また、水平状態と垂直状態での Bi-2223 コイルの発生電圧を比較して、回転によって Bi-2223 コイルが劣化していないかも確認した。

2.6.1 垂直状態での冷却試験及び励磁試験

Fig. 2.9 に、本装置を垂直状態にして冷却を行なった結果を示す。図に示したように、冷却開始約 50 時間後に輻射シールド及び YBCO

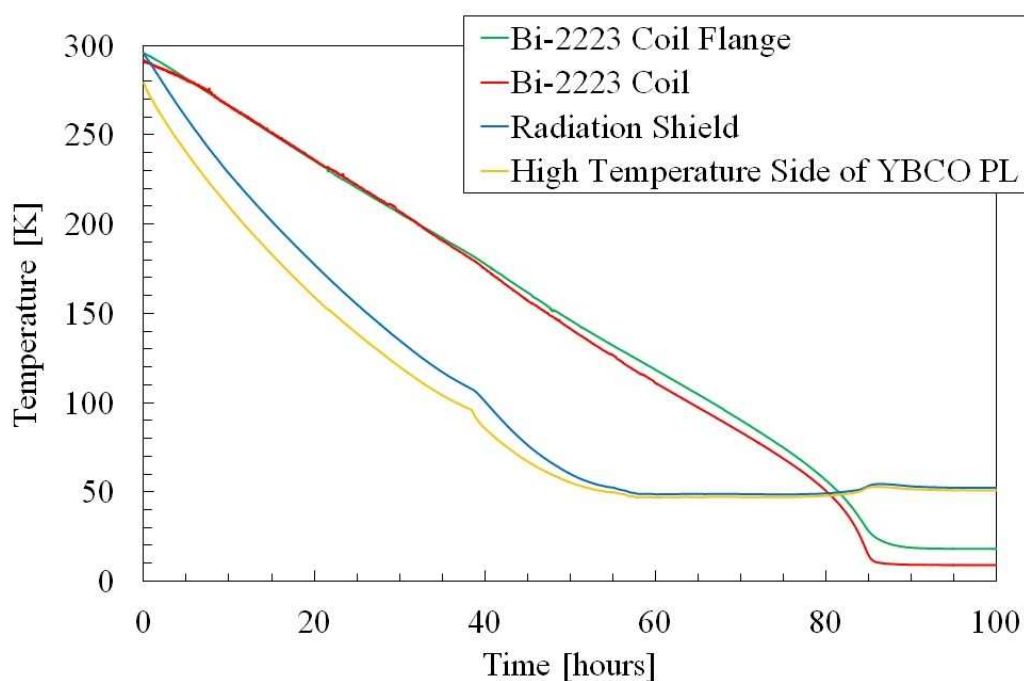


Fig. 2.9 Cooling test results of the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set vertically.

超電導製電流リード高温端が安定し始めて、約 85 時間後に Bi-2223 コイルも安定し始めた。そして、冷却開始約 90 時間後に Bi-2223 コイルが 9.2 K、Bi-2223 コイルのフランジが 18.8 K、輻射シールドが 53.1 K 及び YBCO 超電導製電流リード高温端が 51.5 K となった。既存装置の冷却時間は 56 時間程で、コイルの到達温度は 13 K であった。それと比較して、新規装置は、補強用構造体の追加により冷却時間は長くなったが、到達温度は下回っており、冷却効果は向上したと考えられる。

次に、垂直状態で 180 A までの励磁試験を行なった時の温度変化を **Fig. 2.10** に示す。励磁速度は、既存装置では 3 A/s であったが、回転機構の追加による熱負荷の増加や組み換え作業による Bi-2223 コイルの劣化の可能性を考慮して、安全性を考えて 0.5 A/s とした。図に示したように、励磁過程において Bi-2223 コイル温度は 18.7 K まで上昇したが、180 A の定常状態になると温度が下降し始め、65 分後には 10.8 K となった。そして、輻射シールド及び YBCO 超電導製電流リード高温端は、180 A の定常状態以降も銅製電流リードのジュ

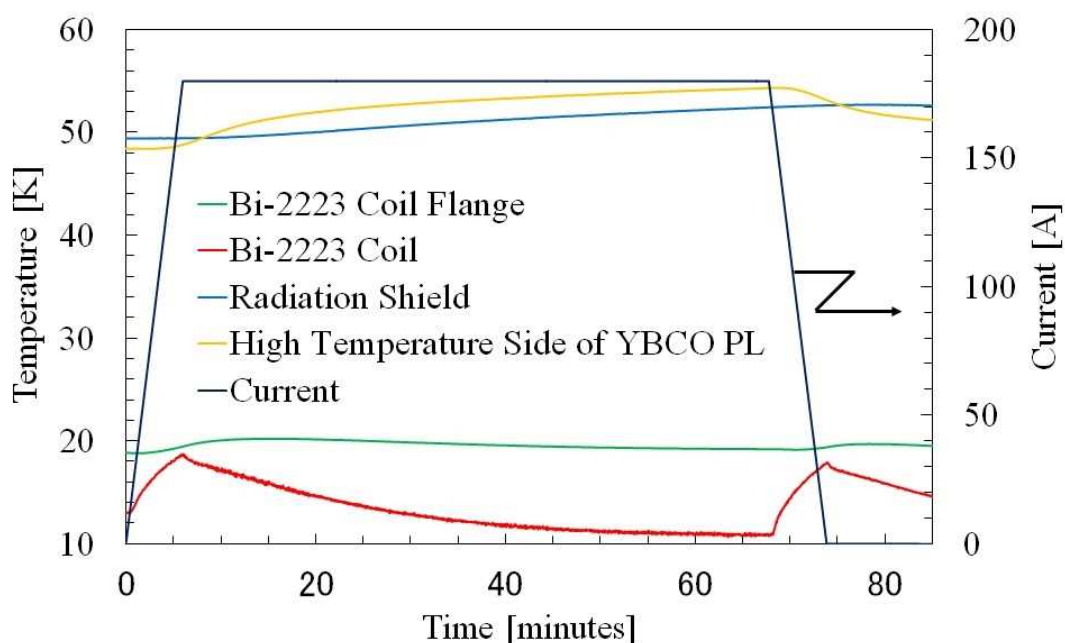


Fig. 2.10 Temperature change in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set vertically.

ール発熱により少しずつ温度が上昇して、65 分後にはそれぞれ 52.3 K 及び 54.2 K となった。既存装置では、180 A 通電後の安定状態におけるコイル温度が 15 K 程だった。それと比較して、新規装置は、コイル温度が下がっており、より安定した状態となったと考えられる。

Fig. 2.11 及び **Fig. 2.12** に励磁試験における Bi-2223 コイルと口出し線の電圧変化を示す。なお、**Fig. 2.11** には 180 A 定常状態において電圧範囲を 0~5 mV に拡大した場合の Bi-2223 コイルの発生電圧も示している。図に示したように、励磁過程において Bi-2223 コイル及び口出し線の発生電圧は、誘導起電力により 0.79 V 及び 14.4 mV まで上昇した。その後、180 A 定常状態においてそれぞれ 2.7 mV 及び 0.2 mV に安定した。

以上の結果より、本装置を垂直状態にした時に Bi-2223 コイルを 180 A まで励磁運転できることが分かった。また、Bi-2223 コイル及び口出し線の発生電圧に異常は見られず、解体・組込作業や冷却時の熱収縮によって劣化・破損は無かったことを確認した。そして、YBCO 超電導製電流リードも 65 分間の励磁で定格温度以下に保持できることを確認した。

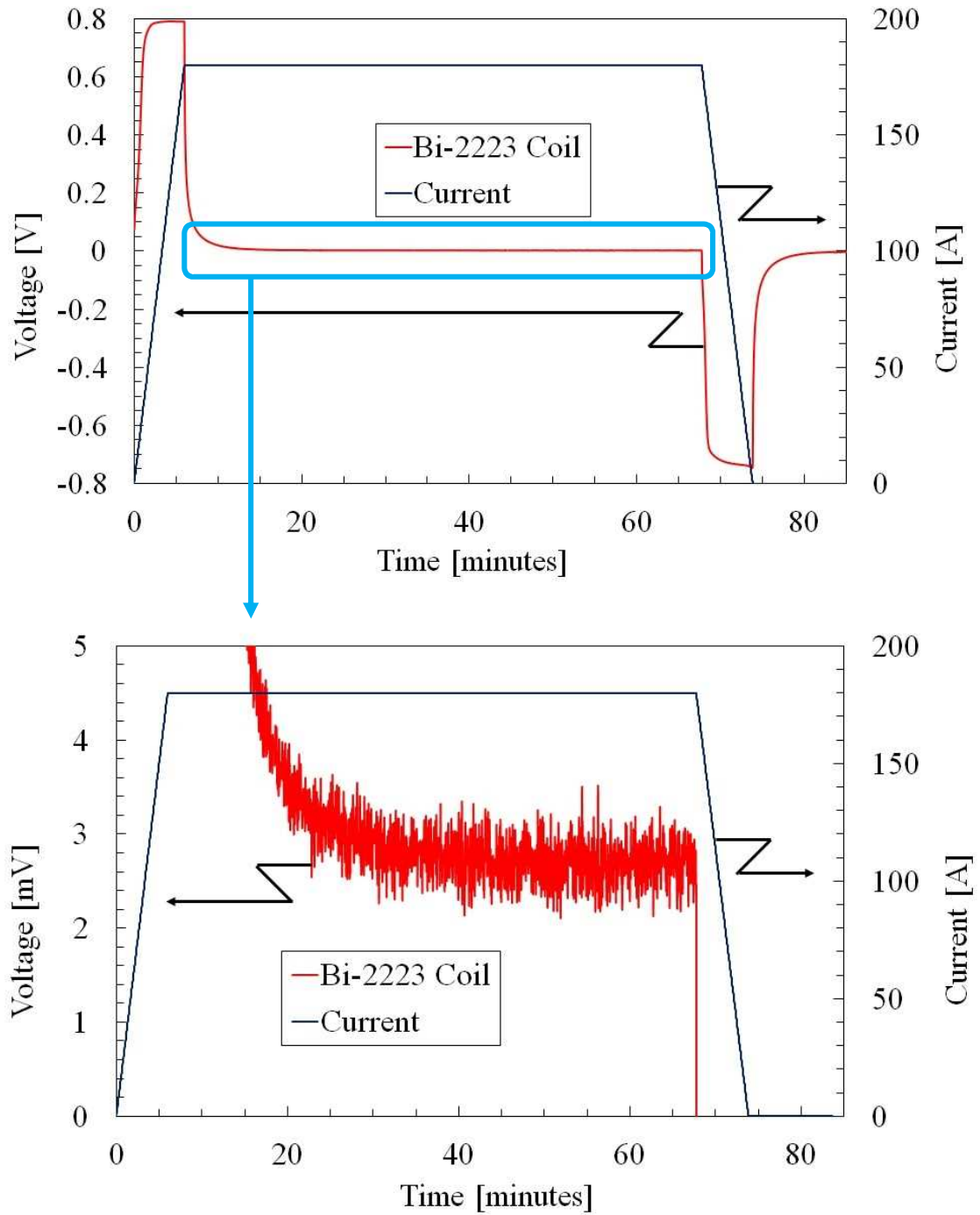


Fig. 2.11 Voltage across the Bi-2223 coil in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set vertically.

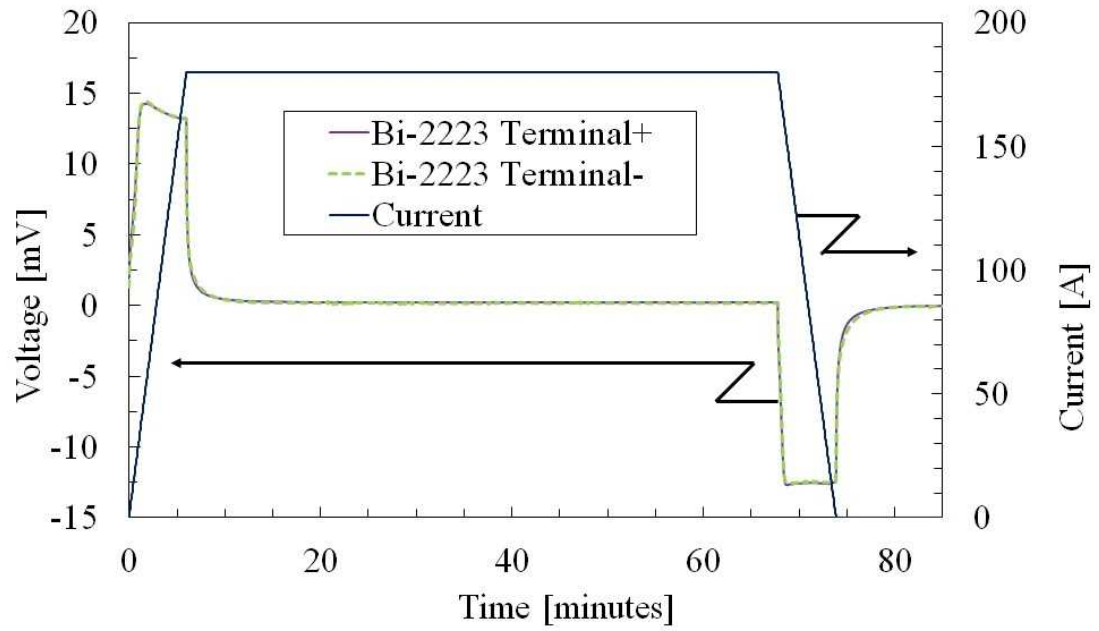


Fig. 2.12 Voltage across the Bi-2223 terminals in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set vertically.

2.6.2 水平状態での冷却試験及び励磁試験

本装置を水平方向に回転させて、冷却試験を行なった。**Fig. 2.13**に示したように、冷却開始約 50 時間後に輻射シールド及び YBCO 超電導製電流リード高温端が安定し始めて、約 80 時間後に Bi-2223 コイルも安定し始めた。そして、冷却開始約 90 時間後に Bi-2223 コイルが 9.4 K、Bi-2223 コイルのフランジが 18.2 K、輻射シールドが 48.0 K 及び YBCO 超電導製電流リード高温端が 49.6 K となった。

次に、水平状態で 180A までの励磁試験を行なった時の温度変化を **Fig. 2.14** に示す。励磁速度は垂直状態と同じ 0.5 A/s とした。図に示したように、励磁過程において Bi-2223 コイル温度は 18.7 K まで上昇したが、180 A の定常状態になると温度が下降し始め、65 分後には 11.0 K、115 分後には 10.7 K となった。そして、輻射シールド及び YBCO 超電導製電流リード高温端は、180 A の定常状態以降も銅製電流リードのジュール発熱により少しずつ温度が上昇して、65 分後にはそれぞれ 52.1 K 及び 54.0 K、115 分後には 53.5 K 及び 55.2 K

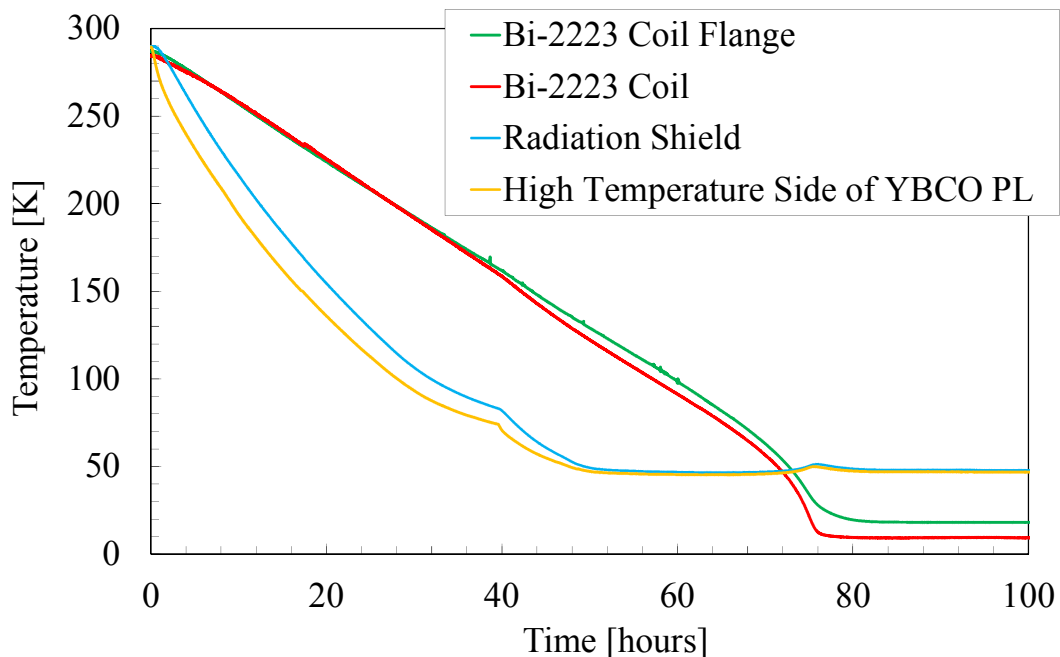


Fig. 2.13 Cooling test results of the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set horizontally.

となった。

そして、**Fig. 2.15** 及び **Fig. 2.16** に励磁試験における Bi-2223 コイルと口出し線の電圧変化を示す。なお、**Fig. 2.15** には 180 A 定常状態において電圧範囲を 0～5 mV に拡大した場合の Bi-2223 コイルの発生電圧も示している。図に示したように、励磁過程において Bi-2223 コイル及び口出し線の発生電圧は、誘導起電力により 0.79 V 及び 14.2 mV まで上昇した。その後、180 A 定常状態においてそれぞれ 2.7 mV 及び 0.2 mV に安定した。

Table. 2.5 に、垂直状態及び水平状態での冷却・励磁試験結果の比較表を示す。表に示したように、本装置を水平状態にした時も、垂直状態と同様に Bi-2223 コイルを 180 A まで励磁運転できることが分かった。また、垂直状態から水平状態に回転させても発生電圧に変化は見られず、Bi-2223 コイル及び口出し線に回転による劣化は見られなかった。そして、YBCO 超電導製電流リードも 115 分間の励磁で定格温度以下に保持できることを確認した。

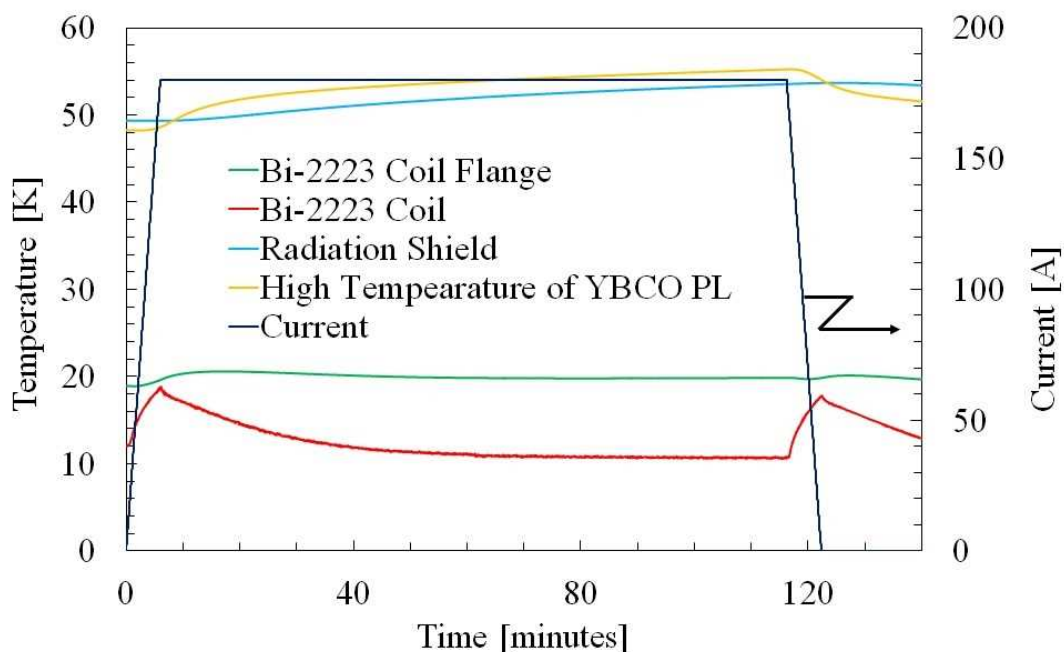


Fig. 2.14 Temperature change in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set horizontally.

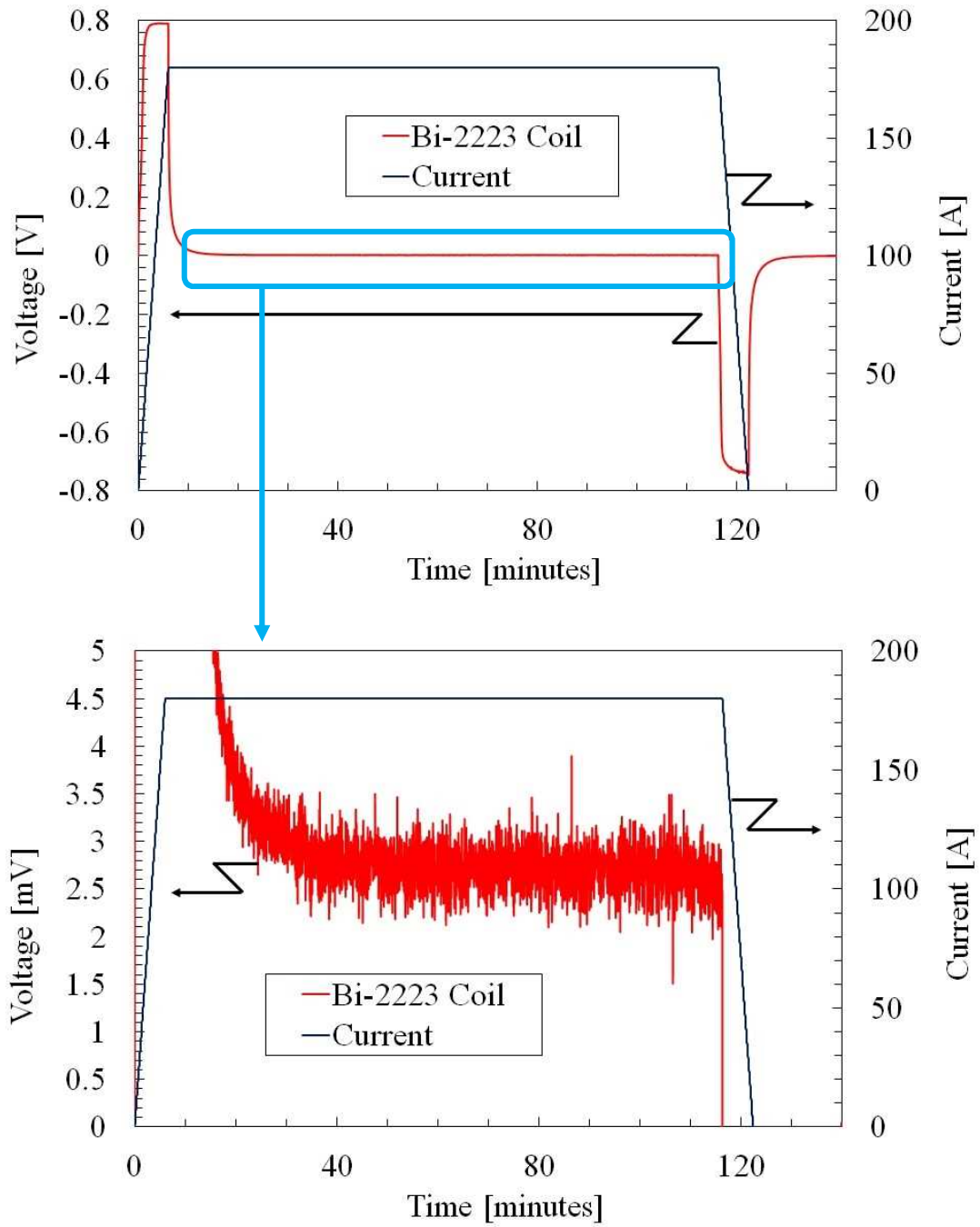


Fig. 2.15 Voltage across the Bi-2223 coil in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set horizontally.

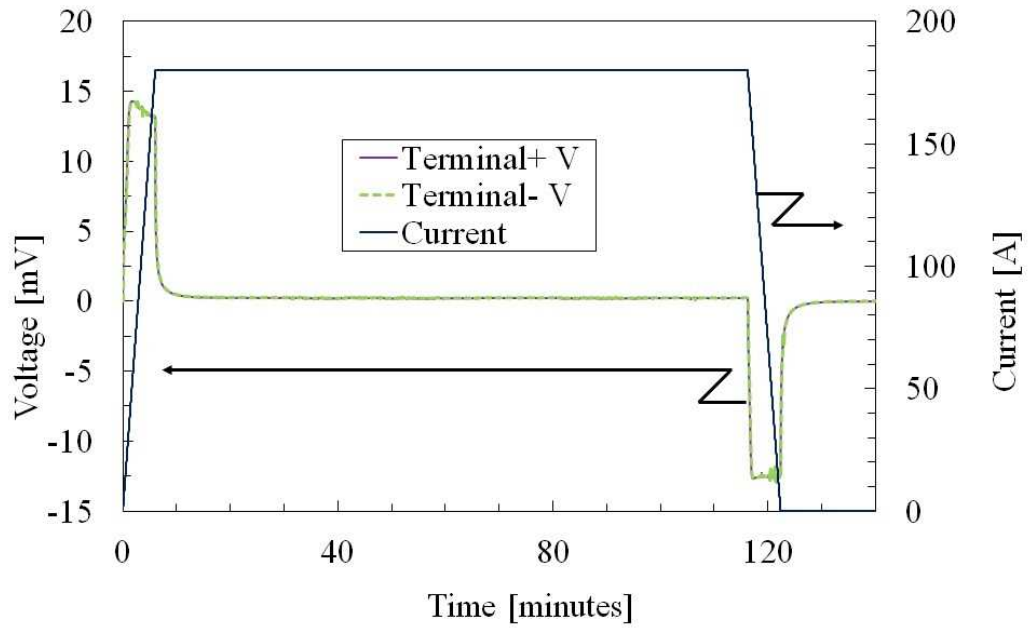


Fig. 2.16 Voltages across the Bi-2223 terminals in operating the developed system with the Bi-2223 coil. The system is set horizontally.

Table. 2.5 Cooling and operating test results of the developed system

		Vertical Position	Horizontal Position
Cooling Test Results	Cooling Time	90 hours	90 hours
	Temperature of Bi-2223 Coil	9.2 K	9.4 K
	Temperature of Radiation Shield	53.1 K	48.0 K
Operating Test Results	Ramping Rate	0.5 A/s	0.5 A/s
	Maximum Temperature of Bi-2223 Coil	18.7 K	18.7 K
	Temperature of Bi-2223 Coil in 180 A Steady State	10.8 K (after 65 minutes)	11.0 K (after 65 minutes)
			10.7 K (after 115 minutes)
	Maximum Voltage of Bi-2223 Coil	0.79 V	0.79 V
	Maximum Voltage of Terminal	14.4 mV	14.2 mV
	Voltage of Bi-2223 Coil in 180 A Steady State	2.7 mV	2.7 mV
	Voltage of Terminal in 180 A Steady State	0.2 mV	0.2 mV

2.7 結言

環境ホルモン除去などの磁気分離用として開発された水平設置型の冷凍機伝導冷却式 Bi-2223 酸化物超電導コイルを用いて、水平方向から垂直方向まで装置全体を回転させて磁場方向とアクセス方向を自在に変えることが出来る磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導マグネット回転式伝導冷却装置の開発を行なった。酸化物超電導の脆弱性を考慮して、回転によるコイルの振動を抑制するための補強対策を行った。

開発した装置の冷却及び励磁試験を行なった。垂直、水平のいずれの状態でも冷却時間は約 90 時間であり、回転移動でのコイルの破損等もなく、励磁速度 0.5 A/s で 180 A までの励磁が可能であることを確認した。今後、励磁速度を上げて、垂直方向及び水平方向状態で 180 A まで運転できることを確認していく予定である。

第 2 章 参考文献

- 1) H. Ishogami, et al.: “Sewage treatment performance of a continuous superconducting-magnetic separator,” Trans. JSME **B 66** (2000) 2194-2199
磯上尚志ら：「連続式超電導磁気分離装置による下水処理特性」，日本機械学会論文集．**B 編 66** (2000) 2194-2199
- 2) N. Saho, et al.: “Magnetic separator for water treatment using superconducting bulk magnets,” TEION KOGAKU **37** (2002) 622-628
佐保典英ら：「超電導バルク磁石を応用した水浄化用磁気分離装置」，低温工学 **37** (2002) 622-628
- 3) T. Oka, et al.: “Magnetic separation of nickel from electroless plating waste fluid using a HTS bulk magnet,” TEION KOGAKU **46** (2011) 655-660
岡徹雄ら：「超伝導バルク磁石を用いた無電解ニッケルめっき廃液の磁気分離」，低温工学 **46** (2011) 655-660
- 4) T. Ohara, et al.: “Magnetic chromatography : Numerical analysis in the case of particle size distribution,” IEEJ Trans. FM **A120** (2000) 62-67
小原健司ら：「粒径分布がある場合の磁気クロマト性能の数値解析」，電気学会論文誌 **A120** (2000) 62-67
- 5) S. Nishijima: “Environmental clean-up by magnetic separation : Volume reduction of contaminated soil by superconducting magnetic separation,” A monthly publication of JSAP **82** (2013) 575-578
西嶋茂弘：「磁気分離による環境浄化 : 超伝導磁気分離による汚染土壌減容化の試み」，応用物理 **82** (2013) 575-578
- 6) H. Ueda, et al.: “Development of medical protein screening system using high Gradient magnetic separation by cryocooler-cooled LTS magnet,” TEION KOGAKU **49** (2014) 25-34
植田浩史ら：「医薬用タンパク質の超電導高勾配磁気分離装置の開発」，低温工学 **49** (2014) 25-34

- 7) H. Kumakura, et al.: “Conduction-cooled $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) magnet for magnetic separation,” *Physica C: Supercond.* **350** (2001) 76-82
- 8) H. Kumakura, et al.: “Development of Bi-2223 magnetic separation system,” *IEEE Trans. Supercond.* **11** (2001) 2519-2522
- 9) T. Ohara, H. Kumakura and H. Wada: “Magnetic separation using superconducting magnets,” *Physica C: Supercond.* **357** (2001) 1272-1280
- 10) T. Ohara, et al.: “Development of magnetic separation systems using superconducting magnets,” *A monthly publication of JSAP* **71** (2002) 57-61
小原健司ら：「超伝導磁気分離システムの開発」，*応用物理* **71** (2002) 57-61
- 11) A. Chiba, et al.: “Removal of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation,” *IEEE Trans. Supercond.* **12** (2002) 952-954
- 12) K. Mitsuhashi, et al.: “Development of a superconducting high gradient magnetic separation system to purify endocrine disrupter polluted water,” *Japan analyst* **52** (2003) 121-126
三橋和成ら：「超伝導磁石を用いる環境ホルモン除去磁気分離システムの開発」，*分析化学* **52** (2003) 121-126
- 13) (社)低温工学協会 編：「超伝導・低温工学ハンドブック」，オーム社，東京 (1993)
- 14) Masafumi Ogata and Katsutoshi Mizuno: “Status of high-temperature superconducting wires in the world,” *RTRI REPORT* **25** (2011) 53-56
小方正文，水野克俊：「世界の高温超伝導線材の現状」，*鉄道総研報告* **25** (2011) 53-56

- 15) M. K. Wu, et al. : “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure,” *Physical Review Letters* **58** (1987) 908-910
- 16) A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo and H. R. Ott: “Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system,” *Nature* **363** (1993) 56-58
- 17) 山田雄一ら : 「高温超電導の応用製品開発事例と今後の展望」, SEI テクニカルレビュー **171** (2007) 55-62
- 18) 前田秀明 : 「超電導マグネット開発のこれまでとこれから (その4)」, 財団法人国際超電導産業技術開発センター Web**21** (2012)
- 19) (社)低温工学協会 編 : 「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社, 東京 (1993)

第 3 章

XMCD 計測用超高真空三軸ボア付 伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット 装置の開発

3.1 緒言

近年、酸化物界面でのスピンー軌道相互作用の重要性や、異種の基底状態間の界面における新規電子状態について、盛んに議論、研究されている¹⁻³⁾。このような界面電子状態の計測方法として、軟 X 線磁気円二色性 (X-ray Magnetic Circular Dichroism : XMCD) が適した手法となっている。Fig. 3.1 に XMCD の概念図を示す。XMCD とは、磁性体に円偏光 X 線を照射した際に、磁性体の磁化方向と円偏光の向きの相対的關係によって、X 線の吸収強度に差が生じる現象であ

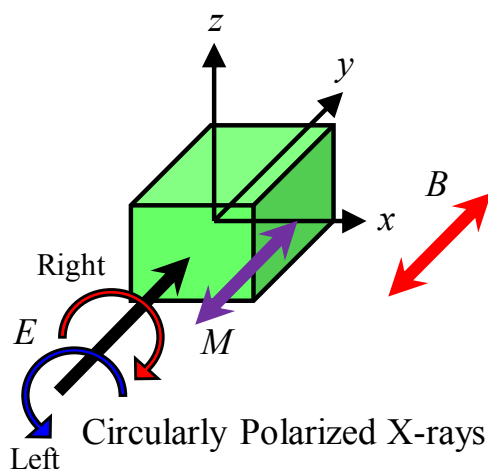


Fig. 3.1 Schematic diagram of the XMCD measurements.

り、その差を解析することによって、スピン磁気モーメントや軌道磁気モーメントを定量的に評価する事が可能である。また、スペクトル形状から、磁性元素の価数等の化学状態に関する情報を得ることが可能である。

従来、強磁場が必要な XMCD 計測には、NbTi 超電導マグネットが利用されてきたが、試料に印加する磁場の向きは固定されており、X 線の照射方向と同じであった⁴⁾。一方、酸化物界面に出現するスピン・軌道・電荷整列といった新規電子相の解明のため、試料への X 線照射方向と磁界印加方向を変えた XMCD 計測を行いたいというニーズが高まっている。そこで、コイル固定のままで磁場方向だけを自在に変えることができる、コイルユニット 4 個で構成された二軸スプリットコイル型のマグネット装置を開発することにした。試料空間中心での方向可変磁場を強くして、なおかつ装置の小型化を達成するため、コイルユニット間距離を可能な限り狭めるように、コイルユニットをテーパ形状にすることを考案した。酸化物超電導線材はテープ形状なので、パンケーキコイルを段階的に大きくして積層すれば、テーパ形状のコイルユニットの実現が可能であると考えた。XMCD 用磁場方向可変マグネットとしては、水冷銅マグネット⁵⁾、NbTi 伝導冷却マグネット⁶⁾が開発されているが、酸化物超電導線材の適用は例がない。酸化物超電導の利用は、水冷銅マグネットに比べて通電損失が小さいことはもちろん、金属系超電導マグネットより運転温度を高く設定できるため、冷却系への負担が少なく、装置の小型化が容易になる等のメリットがある。**Table. 3.1** に示したように、本装置は既存の XMCD 計測装置に無い 1 T 以上の方向可変磁場を発生させることを目標とした。本マグネットは、運転の簡便化のために、冷凍機による伝導冷却仕様とした。この方向可変磁場を用いて XMCD の磁場角度依存性を計測することにより、磁性体の磁気異方性を評価することが可能になると考えた。また、1 T 以上の最大磁場を発生することによって、より多くの磁性体の計測が可能となる。本装置の実現によって、超薄膜の新規電子状態や、銅酸化物超電導体の磁束状態・磁場誘起反強磁性状態等の解明が期待される。

Table. 3.1 Comparison of XMCD experimental systems

Experimental station	Magnet	Magnetic field rotation	Sample rotation	Polarization	Cooling method
This Study	Superconducting magnet (YBCO, 1 T)	Yes	Yes	Switchable (AC 10 Hz)	Cryocooler -cooled
KEK-PF BL-16	Superconducting Magnet (NbTi, 5 T)	No	Yes	Switchable (AC 10 Hz)	Liquid helium -cooled
SPring-8 BL23SU (JAEA)	Superconducting Magnet (NbTi, 10 T)	No	No	Switchable (AC 1 Hz)	Liquid helium and cryocooler -cooled
Advanced Light Source BL4.0.2 (USA)	Cu magnet (0.9 T)	Yes	Yes	Switchable (AC 0.25 Hz)	Water-cooled
NSRRC BL-11A (Taiwan)	Cu magnet (1 T, Fixed)	No	Yes	Fixed	Water-cooled

3.2 YBCO コイルの設計及び仕様

YBCO コイルの試料空間中心において、最大磁場 1 T の 2 次元磁場方向可変ベクトルマグネット用の YBCO コイルの開発することにした。使用する線材は、Super Power 社製の YBCO 酸化物超電導テープ導体 SCS4050AP とした。YBCO 線材を採用する理由は、高磁場中での臨界電流が高く、高温域（30 K）において磁場異方性が Bi 系線材に比べて小さいこと⁷⁾、また、最小巻直径がカタログ上 $\phi 11$ mm であり、Bi 系線材（ $\phi 60$ mm）と比べて小さくできるため、小型化に適しているということなどである。

コイルユニットは、試料空間中心で最大磁場 1 T を発生させるため、コイルユニット間距離を可能な限り狭めるように、パンケーキコイル外径を段階的に大きくさせたテーパ形状とした⁸⁾(**Fig. 3.2 (a)**)。また、パンケーキコイルの積層数は 7 個として、ボビン内径を 40 mm とした (**Fig. 3.3**)。テーパ形状のコイルユニット 2 個で 1 式のスプリットコイルとなっており、そのスプリットコイルが垂直軸上及び

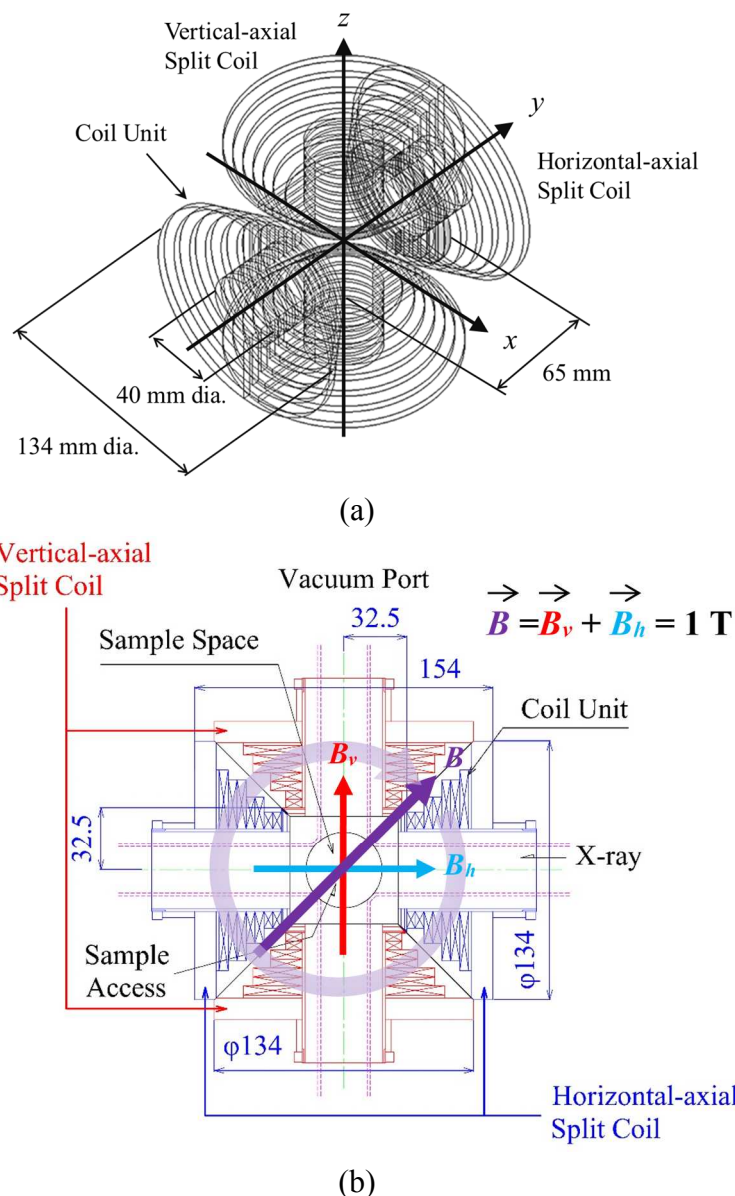


Fig. 3.2 Outline drawings of the YBCO coil which consists of four taper-shaped coil units. The drawings are shown as (a) 3D diagram and (b) cross section diagram. Horizontal- and vertical-axial split coils are located along the y- and z-axis, respectively.

水平軸上に位置している。2 台の電源を使用して、垂直軸及び水平軸スプリットコイルによって個別に発生させた磁場の合成ベクトルが方向可変磁場となる (**Fig. 3.2 (b)**)。本コイルは、運転の簡便化のために、冷凍機による伝導冷却仕様とした。また、使用する YBCO 超電導テープ導体の通電特性が 30 K 近辺から向上することが知られている⁷⁾ことから、設計運転温度を 30 K とした。なお、**Table 3.2** と **Table 3.3** にコイルに用いた線材とコイルの緒元を示す。

試料空間において 1 T の磁場を発生させることができる電流をコイルに通電すると、コイル自身は寄り大きな磁場を経験するので、この経験磁場が臨界電流を越えないような設計が必要となる。そのために、試料空間に YBCO コイルが 1 T の磁場を発生させた時のコイル全体での磁場分布を計算した。**Fig. 3.4 (a)**は垂直方向に 1 T 発生した場合、**Fig. 3.4 (b)**は 45° 方向に 1 T 発生した場合である。また、それぞれについて、最大経験磁場の発生箇所も示している。試料空間中心で YBCO コイルが水平又は垂直方向に 1 T 発生させる時の最大経験磁場は、テープ面に平行に 3.5 T であり、その位置は通電されたスプリットコイルの各コイルユニットの中心内径部分である。そして、45° 方向に 1 T 発生させる時の最大経験磁場は 2.8 T であり、その位

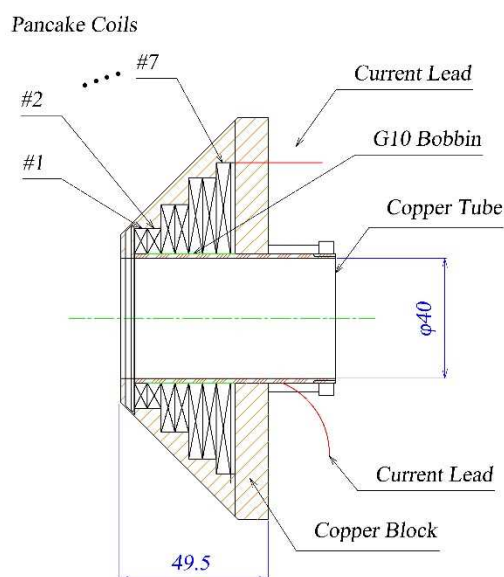


Fig. 3.3 Detailed drawing of cross section of the coil unit. The coil unit comprises seven YBCO pancake coils.

置は各コイルユニットの試料空間側に位置する最内側パンケーキコイル（パンケーキコイル#1） 或いは最外側パンケーキコイル（パンケーキコイル#7）の内周付近にあり、テープ面に侵入する磁場角度は、位置によって異なる。140 A 通電時のコイル電流密度は、 255.6 A/mm^2 （絶縁材及びスペーサを含んだエンジニアリング電流密度）である。

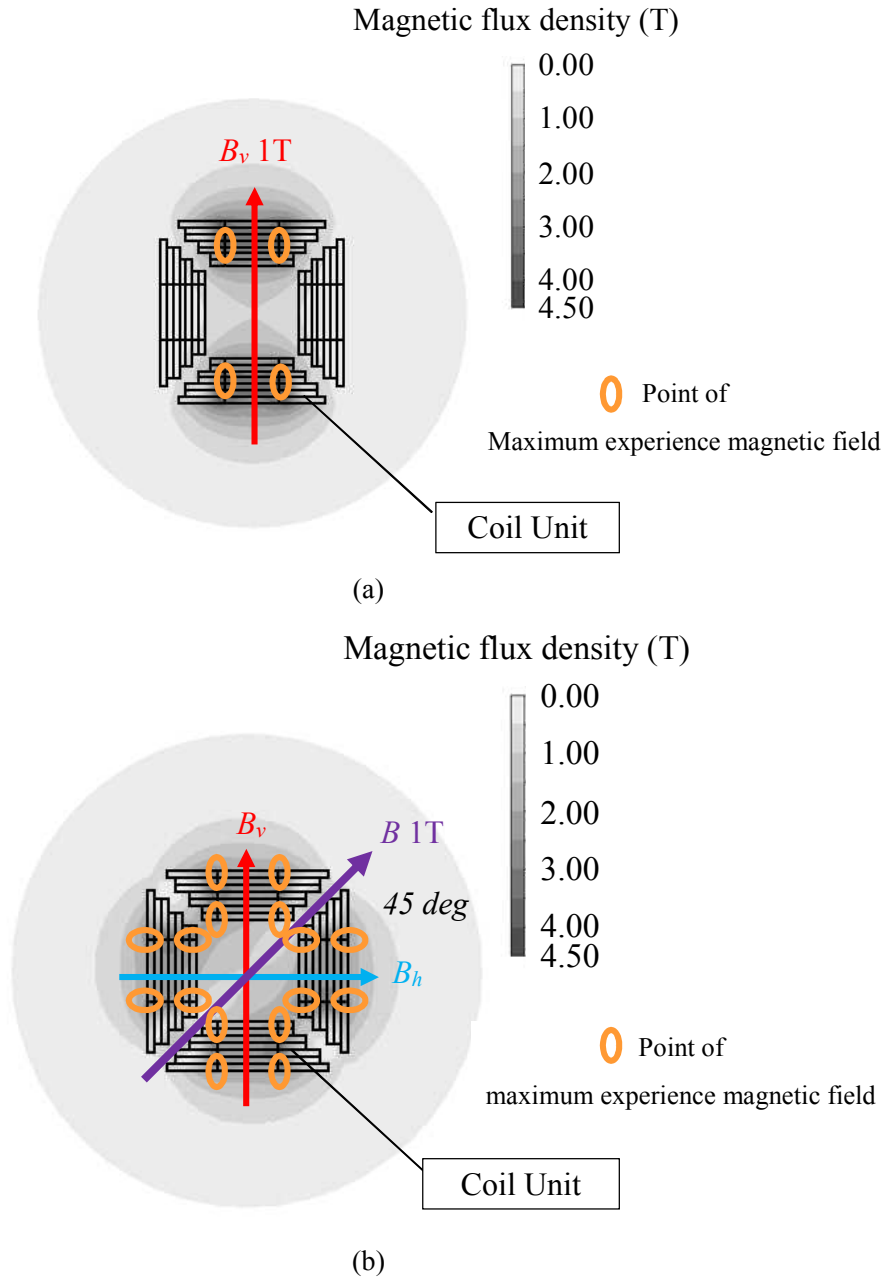


Fig. 3.4 Calculated magnetic field distribution of the YBCO coil. The magnetic field on the center of the sample space is 1T at an angle of (a) 90 degrees and (b) 45 degrees.

Table 3.2 Specifications of the coil unit

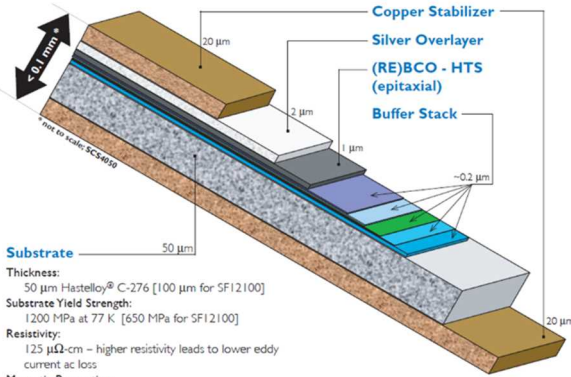
Conductor	-YBCO tape conductor -SCS4050AP; SuperPower Inc. -Widths : 4 mm -Total Wire Thickness : 0.1 mm -Standard Copper Stabilizer -Thickness : 0.04 mm -Critical Tensile Stress : > 550 MPa at 77 K -Critical Axial Tensile Strain : 0.45% at 77 K -Critical Bend Diameter in Tension : 11 mm -Critical Bend Diameter in Compression : 11 mm -I_c (10^{-6} V/cm criterion) : > 130 A at 77 K, self-field
 Substrate Thickness: 50 μm Hastelloy® C-276 [100 μm for SF12100] Substrate Yield Strength: 1200 MPa at 77 K [650 MPa for SF12100] Resistivity: 125 μΩ-cm ~ higher resistivity leads to lower eddy current ac loss Magnetic Properties: non-magnetic, leads to lower ferromagnetic ac loss	View showing of a frame format of layers of the tapeconductor.
※This is abstracted from the Catalog of SuperPower Inc.	
Configuration	Seven taper-shaped pancake coils
Total length of YBCO tape [m]	208.9
Total number of turns	1004
Design operating temperature [K]	30
Design operating current [A]	140
Current density [A/mm ²]	255.6
Inner diameter of the copper casing [mm]	40
Impregnation	Paraffin wax impregnation

Table 3.3 Specifications of the seven pancake coils

No.	Inner dia. [mm]	Outer dia. [mm]	Number of turns	Length of YBCO tape [m]
1	43	60	68	11
2	45	60	60	9.9
3	45	76	124	23.6
4	45	76	124	23.6
5	45	94	196	42.8
6	45	94	196	42.8
7	45	104	236	55.2

コイルへの通電電流は、コイルの発熱や熱暴走の防止のために、臨界電流値以下にする必要があるので、これについて検討を行なった。コイル用線材として使用する YBCO 超電導テープ導体（Super Power 社製：SCS4050AP）の臨界電流の大きさは、印加される磁場角度に依存する。このテープ導体には人工ピンが埋め込まれており、それによって、印加される量子化磁束をピン止めして、磁場中の臨界電流を向上させる効果がある。しかし、この人工ピンの影響で、印加磁場方向がテープ表面に対して垂直より数度ずれた角度の時に臨界電流が最小となることが報告されている⁷⁾。SCS4050AP の磁場角度依存性にこのような特徴があるため、磁場角度を考慮してコイルの臨界電流を求める計算は複雑化する。そこで、SCS4050AP に様々な角度で磁場を印加して計測された臨界電流の中で、最小となる臨界電流をその磁場の強さに対する臨界電流（最小臨界電流）と定義した。そして、前述の最大経験磁場 3.5 T での YBCO コイルの運転電流 140 A が最小臨界電流以内であることを確認することで設計のマーヅンを確かめた。コイル通電時の温度は、前述の通り 30 K とした。Fig. 3.5 に $I_c - B - \theta$ データ⁷⁾から抽出した SCS4050AP の 77 K と 30 K における磁場の強さに対する最小臨界電流値を示す。この図には、設計した YBCO コイルの運転電流に対する最大経験磁場を表すロードラインも示している。図に示したように、30 K での磁場の強さ 3.5 T における最小臨界電流は 202 A であり、運転電流 140 A に対してマーヅンが

約30%あることが分かる。よって、設計通りにコイルを運転できることが確認できた。以下の節では、この指針を元にコイルユニット毎の思索とその評価について述べる。

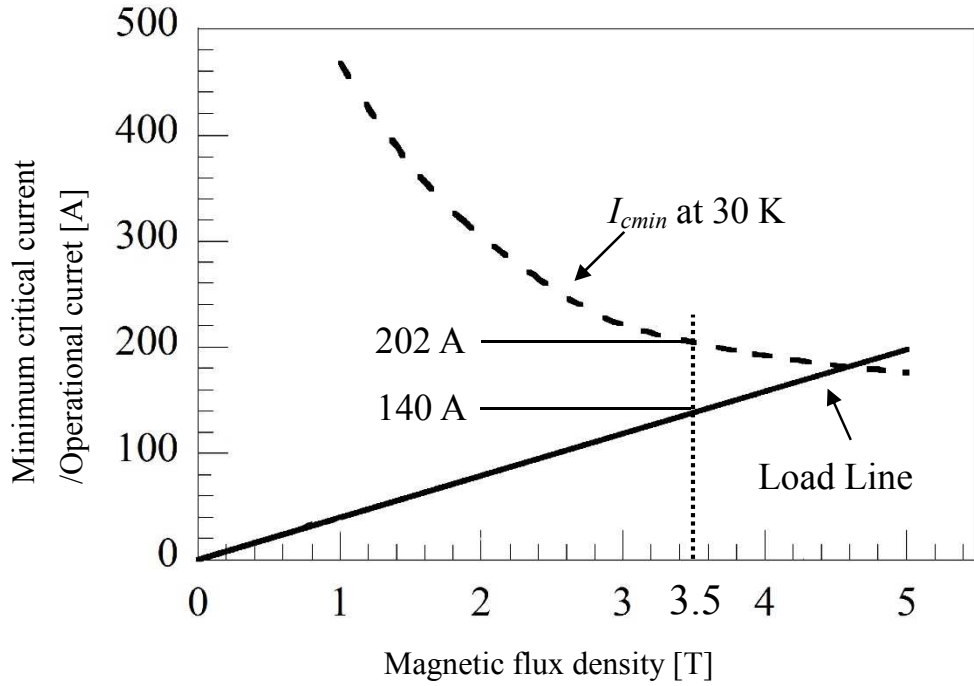


Fig. 3.5 Minimum critical currents of YBCO tapes derived from measured $I_c - B - \theta$ data (dashed curves) at 30 K. The load line of the YBCO coil is also shown.

3.3 コイルユニット 1 の製作及び評価

この節では、前節で得た指針を元に、まずテーパ形状のコイルユニットを試作し（コイルユニット 1）、その評価を行なった。評価の内容は液体窒素浸漬での V - I 特性計測（3.3.2 項）、冷凍機伝導冷却での V - I 特性計測（3.3.3 項）、電気抵抗計測（3.3.4 項）及び一定時間通電試験（3.3.5 項）、コイル含浸についての評価（3.3.6 項）である。

3.3.1 コイルユニット 1 の製作

コイルユニット 1 の製作の第一段階として、はじめに、**Fig. 3.3** に示したユニットコイル内のシングルパンケーキコイル#1 の製作を以下の手順で行なった。

1. 銅製コイルとボビンの電気絶縁作業

冷却を兼ねた銅製コイルボビン（内径 40 mm、外径 43 mm）の外表面を電気絶縁用のポリミドシートで覆う。

2. 電流導入線の設置

電流導入線となる短尺 YBCO テープ導体の超電導面を外側にし、銅製コイルボビンの外表面（ポリミドシートの上面）に軸方向に沿って設置する。

3. 巻線導体の設置及び半田接続

#1 巻線用の長尺 YBCO テープ導体の超電導面を内側にし、導体方向を銅製コイルボビンの円周方向にした状態で、巻線導体と電流導入線の超電導面が重なるようにハンダ接続する。

※ハンダゴテの設定温度：250 °C 以下（メーカー推奨値）

4. 巻線

巻線層間の電気絶縁を行うために、厚さ $25\text{ }\mu\text{m}$ のポリミドテープを巻線用導体に共巻きして巻線を行なう。(68 ターン巻き)

次に、ダブルパンケーキコイル#2-#3 の製作を行なった。ダブルパンケーキコイルは、巻線を行なう前にパンケーキコイル最内巻層同士を接続する必要がある。ダブルパンケーキコイル#2-#3 の製作手順は、最内巻線接続も含めて、以下の通りである。

1. GFRP 製リング及び接続導体

GFRP 製リング（内径 43 mm、外径 45 mm）を用意して、#2 と#3 の最内巻線を接続するための短尺 YBCO 超電導テープ導体の超電導面を外側にして、GFRP 製リングの外表面に設置する。

2. 巻線導体と接続導体のハンダ接続

#2 及び#3 巻線長尺 YBCO 超電導テープ導体の超電導面を内側にして、導体方向を GFRP 製リングの円周方向にした状態（#2 と#3 の導体方向は反対向き）で、巻線導体と接続線の超電導面が重なるようにハンダ接続する。

※ハンダゴテの設定温度：250 °C 以下（メーカー推奨値）

3. 巻線

ポリミドテープと巻線用導体を共巻して巻線を行う。一方のパンケーキコイルの巻線が終了したら、パンケーキコイル間の電気絶縁のために 0.3 mm 厚の GFRP 円板を挟んで、もう一方のパンケーキコイルの巻線を行う。

上記の手順で、#2 と#3 を 60 ターンと 124 ターン巻いてダブルパンケーキコイル#2-#3 を完成させた。ダブルパンケーキ#4-#5（124-196 ターン巻き）及び#6-#7（196-236 ターン巻き）も同様な手順で巻線を行なった。

巻き終った全てのパンケーキコイルを用いて、コイルユニット 1 を以下の手順で完成させた。

1. 銅円板設置 1

シングルパンケーキ#1 が巻かれた銅製コイルボビンに、熱伝導促進のために、表面がポリミドシートで電気絶縁された 0.3 mm 厚の銅円板を設置する。

2. 積層 1

銅円板を挟み込むように#2－#3 ダブルパンケーキコイルを銅製コイルボビンに挿入する。

※この時点での積層順：(#1)－銅円板－(#2－GFRP 円板－#3)

3. 積層 2

#2－#3 に手順 1 と同様に電気絶縁された銅円板を設置して、#4－#5 を挿入する。

4. 積層 3

#4－#5 に手順 1 と同様に電気絶縁された銅円板を設置して、#6－#7 を挿入する。

5. 銅円板設置 2

#1 及び#7 の外面に手順 1 と同様に電気絶縁された銅円板を設置する。

※この時点での積層順：

銅円板－(#1)－銅円板－(#2－GFRP 円板－#3)－銅円板－(#4－GFRP 円板－#5)－銅円板－(#6－GFRP 円板－#7)－銅円板

6. 直列接続

全てのパンケーキコイルの最外巻層に端線が露出している状態なので、#1－#2 間、#3－#4 間及び#5－#6 間を接続用の短尺 YBCO テープ導体を用いてハンダ接続する。これによって、全てのパン

ケーキコイルが直接に接続される。

※ハンダゴテの設定温度：250 ℃以下（メーカー推奨値）

7. 完成

直列接続した#1－#7 パンケーキコイルを無酸素銅プレートの上に設置して、コーン型の無酸素銅ケースを被せてネジ止めする。

Fig. 3.6 に、上記の手順で完成したコイルユニット 1 に無酸素銅ケースを被せる前の内部写真を示す。同プレート及びケースは渦電流防止のため、スリット加工を施している。そして、ケースを被せた後、ケース内部にパラフィンを注入して含浸を行なった。

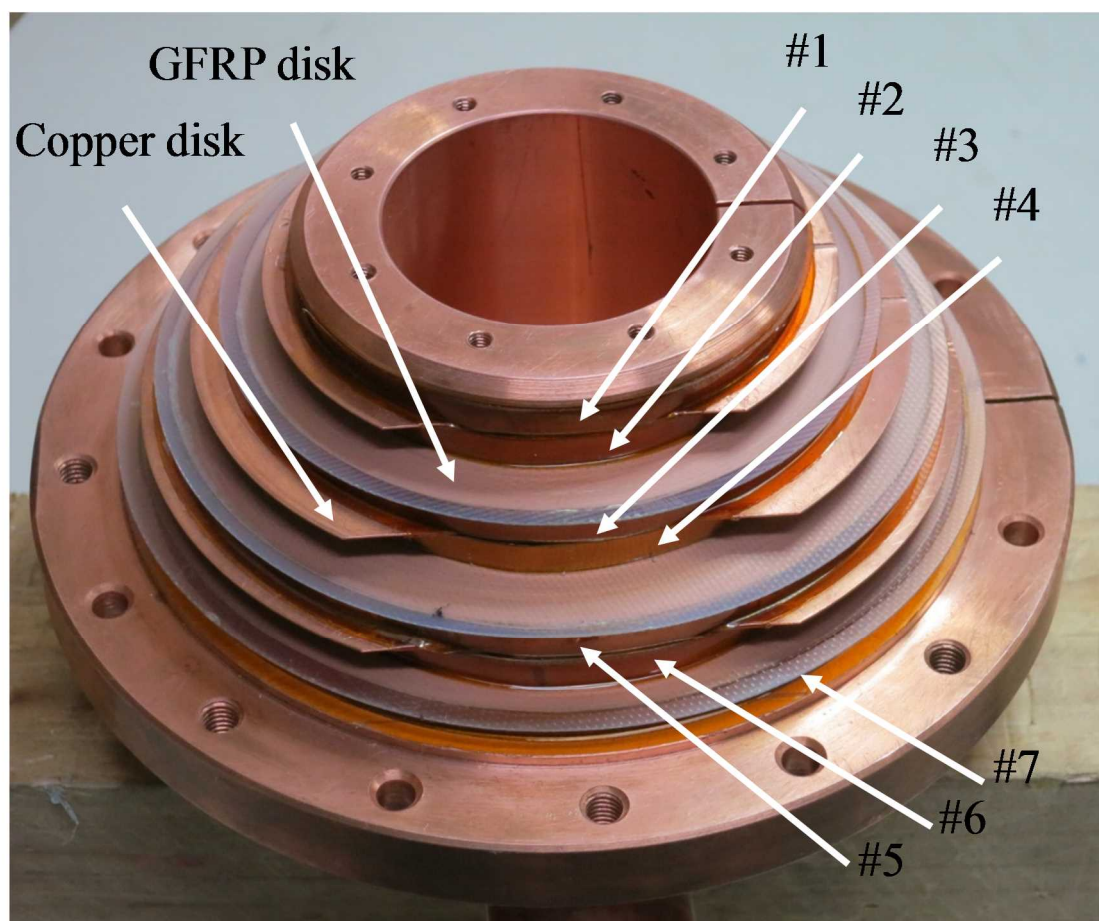


Fig. 3.6 Photograph of the 1st YBCO coil unit without a copper casing. It is taper-shaped and consists of seven single-pancake coils.

3.3.2 液体窒素浸漬での V - I 特性計測

コイルユニットの設計や製作方法に問題がないかの評価の第 1 段階として、完成したコイルユニット 1 を液体窒素に浸漬して、液体窒素温度での V - I 特性を計測した。**Fig. 3.7** に示したように、YBCO コイルの 77 K における最小臨界電流は 31 A となる。この値は、使用した線材 SCS4050AP の 77 K での最小臨界電流曲線 (I_{cmin} at 77 K) とコイルユニットのロードラインの交差点における電流である。つまり、77 K において、31 A まで通電する間に大きな電圧発生やクエンチがなければ、評価の第 1 段階をクリアしたと考えられる。また、この計測から、製作過程（巻線作業、ハンダ接続、パラフィン含浸）や冷却による歪みによって、コイルユニットに大きな劣化や損傷が発生していないかをある程度知ることもしできる。

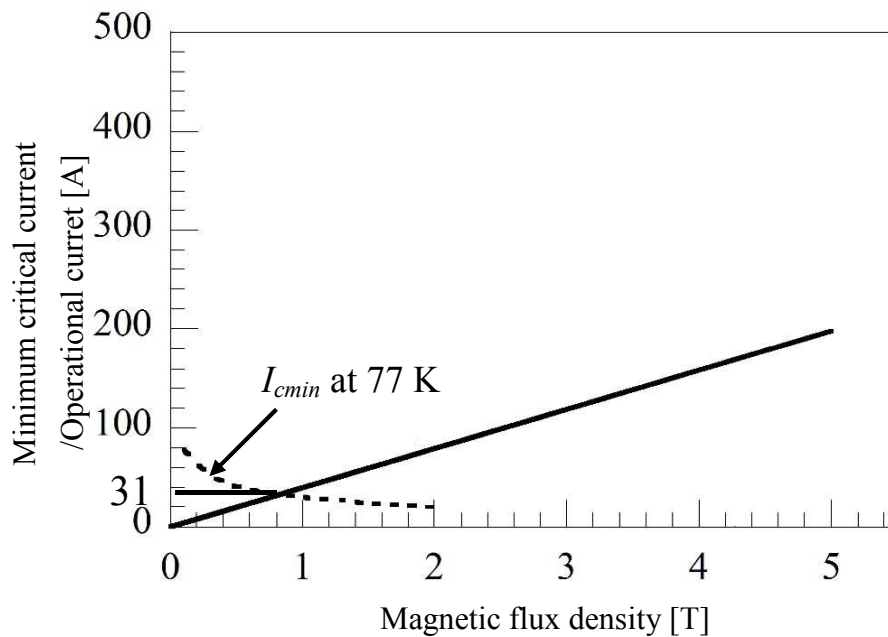


Fig. 3.7 Minimum critical currents of YBCO tapes derived from measured $I_c - B - \theta$ data (dashed curves) at 77 K. The load line of the YBCO coil is also shown.

Fig. 3.8 にコイルユニット 1 の 77 K での V - I 特性を示す。電流は 0 A から 31 A まで 0.5 A/s でリニアに増加させて計測したために、超電導であっても自己インダクタンスによる誘導電圧約 27 mV が発生している。誘導電圧から算出した自己インダクタンスは 48 mH であり、これは設計値と一致する。通電電流が 27 A より大きい値では磁束フローによる電圧上昇が見られたが、大きな電圧発生やクエンチは見られなかった。この結果から、コイルユニットの設計や製作方法に関する評価の第 1 段階をクリアしたと言える。また、コイルユニット 1 に大きな劣化や損傷がないことも確認することが出来た。

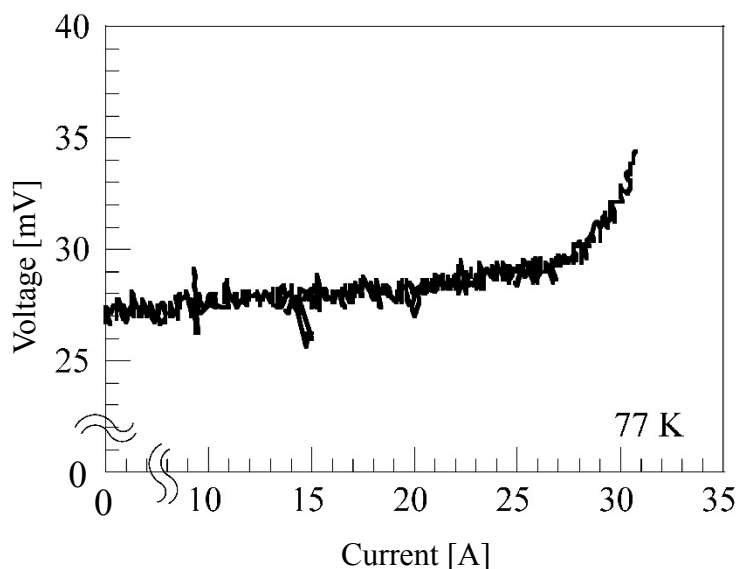


Fig. 3.8 V - I characteristics of the 1st coil unit at 77 K.

3.3.3 冷凍機伝導冷却での電気抵抗計測

1つのコイルユニットの半田接続部は14箇所あり、通電中に各接続部にジュール熱が発生する。YBCO コイルは冷凍機による伝導冷却を採用したので、熱設計を行うためにジュール熱を事前に確認しておく必要がある。そこで、試験用冷凍機伝導冷却装置用いてコイルユニット1を30 Kまで冷却した状態で、電流値を変化させながら電気抵抗を計測した。その結果、平均電気抵抗値は $11.5\ \mu\Omega$ であった。YBCO 線材が全て超電導状態とすると、ハンダ接続部1箇所の抵抗は $0.8\ \mu\Omega$ となる。以上より、100 A 及び 140 A 通電時に1つのコイルユニットに発生するジュール発熱は、それぞれ 0.12 W 及び 0.23 W であることが分かった。これは、後述の熱設計の節で触れるが、冷却温度 30 K の冷凍機伝導冷却には殆ど影響を与えない数値であった。

3.3.4 冷凍機伝導冷却での V - I 特性計測

3.3.2 項で、液体窒素浸漬されたコイルユニット 1 の V - I 特性を計測したが、評価の第 2 段階として、試験用冷凍機伝導冷却装置を用いて、コイルユニット 1 を設計運転温度 30 K まで冷却して V - I 特性を計測した。これは、より実際の運転に近い状態での評価となる。そして、磁場の評価も行うために、ホール素子を使用して発生磁場を計測した。ホール素子は、シングルパンケーキ#1 の上面の中心から 4.5 mm の位置に設置した。**Fig. 3.5** に示したように、YBCO コイルの 30 K における臨界電流は 180 A となる。この値は、使用した線材 SCS4050AP の 30 K での最小臨界電流曲線 (I_{cmin} at 30 K) とコイルユニットのロードラインの交差点における電流である。したがって、計測時の電流は、クエンチが発生しないように 170 A までとした。計測結果として、**Fig. 3.9** にコイルユニット 1 の 30 K での V - I 特性とホール素子で計測した磁場を示す。通電は 0 A から 170 A まで 0.4 A/s でリニアに増加させたため、自己インダクタンスによる誘導電圧約 20 mV が発生した。誘導起電力から計算した自己インダクタンスは 50 mH で、設計値とほぼ一致した。図に示したように、100 A 近辺

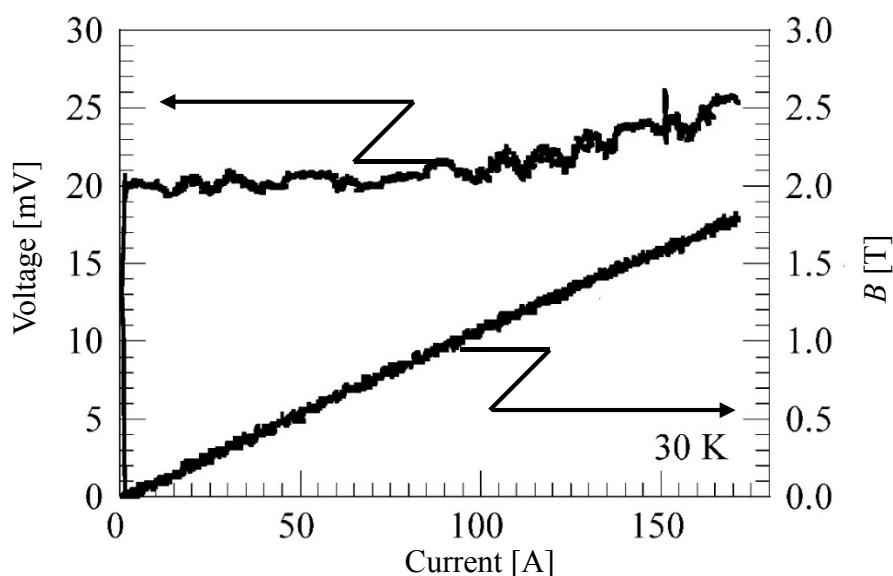


Fig. 3.9 V - I characteristics and magnetic field of the 1st coil unit at 30 K.

から磁束フローによる緩やかな電圧上昇が見られたが、大きな電圧発生やクエンチは見られなかった。そして、170 A 通電時の計測磁場は 1.8 T であった。これは、磁場分布の数値解析結果と一致した。以上より、実際の運転に近い状態とした評価の第 2 段階においても、コイルユニットの設計や製作方法に問題が無いことを確認した。また、コイルユニット 1 に大きな劣化や損傷がないことも確認することが出来た。

3.3.5 冷凍機伝導冷却での一定時間通電試験

次に、長時間通電中に大きな電圧やクエンチが発生しないかを確認するために、30 K に伝導冷却されたコイルユニット 1 に 170 A 通電を 300 秒間行い、その時の発生電圧を計測した。Fig. 3.10 に示したように、電流保持中に電圧上昇は見られなかった。170 A 到達時に瞬間的に電圧が変動しているのは、電源のノイズによるものと考えられる。電圧がこの結果から長時間の通電運転も可能であることを確認した。

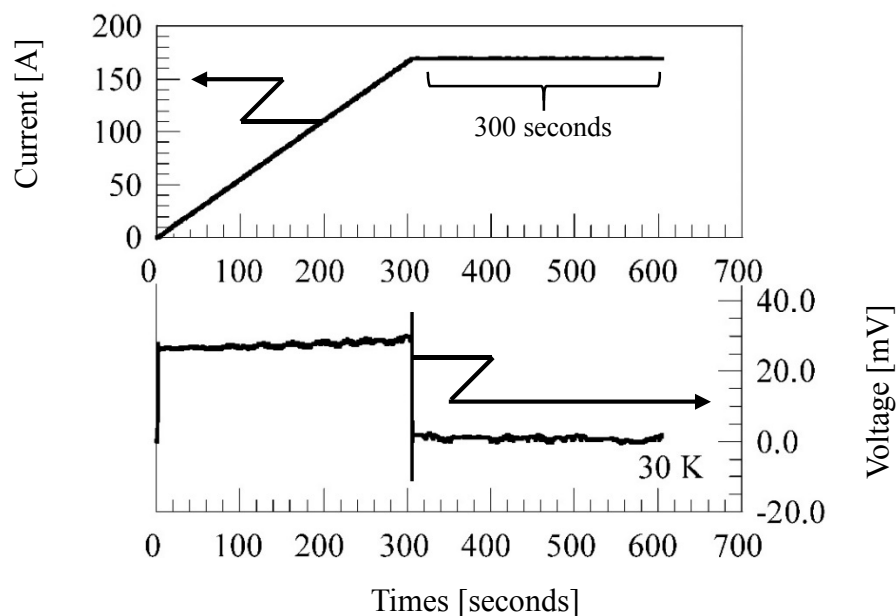


Fig. 3.10 Measuring results of long-term current test of 1st coil unit. The current was kept at 170 A for 300 seconds.

3.3.6 パラフィン含浸による効果

YBCO テープ導体製の超電導コイルは、パラフィン含浸することによって、冷却や通電時に発生する YBCO テープ導体の剥離を防止できると報告されている⁹⁾。また、含浸することによって、線材とコイルケースやボビン等の熱パスとの隙間を埋めることが出来るため、伝導冷却効率が上がることも期待される。そこで、パラフィン含浸による効果を確認するために、パラフィン含浸前のコイルユニット 1 についても、試験用冷凍機伝導冷却装置を用いて、30 K に伝導冷却して通電試験を行っておいた。

Fig. 3.11 にパラフィン含浸前後のコイルユニット 1 の V - I 特性の比較を示す。発生電圧に大きな変化は見られなかったが、ノイズレベルが低くなったことを確認した。これより、パラフィン含浸によって YBCO テープ導体が固定されて、ローレンツ力によるテープ導体の位置ずれが少なくなったものと考えられる。

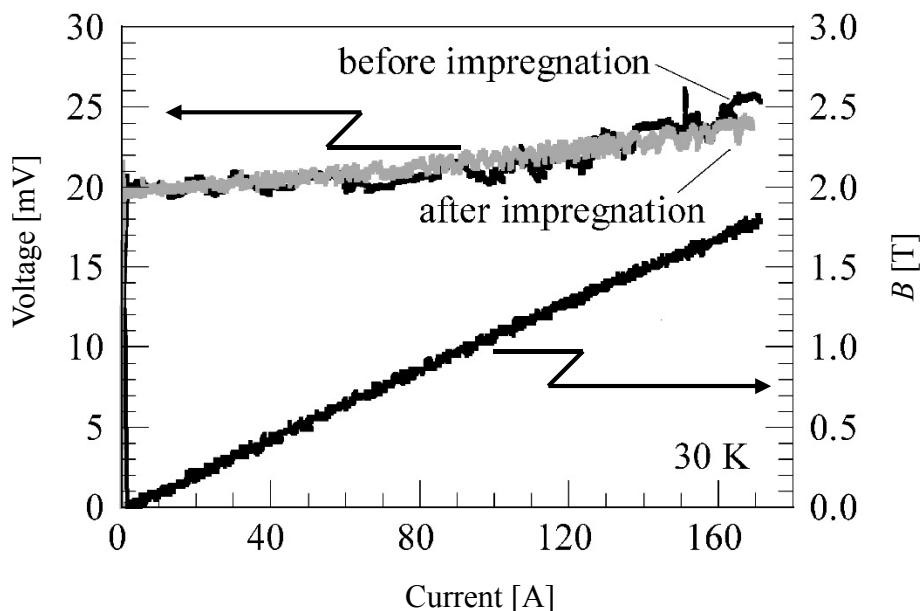
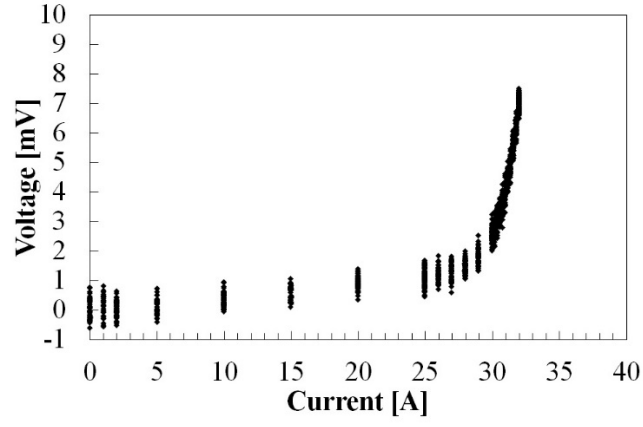


Fig. 3.11 V - I characteristics of the 1st coil unit before and after paraffin impregnation. The voltage remained largely unchanged. The noise level was lowered.

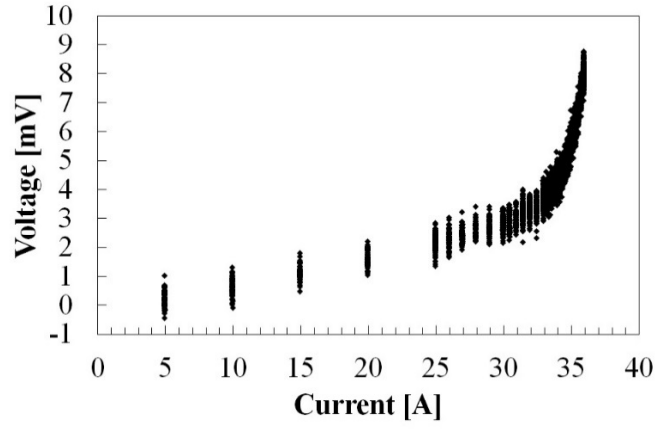
3.4 コイルユニット 2、3、4 の液体窒素浸漬での V - I 特性計測

コイルユニット 1 の各評価結果から、設計および製作方法に問題ないことが確認されたので、同様の製作方法でコイルユニット 2、3 及び 4 を製作した。そして、各コイルユニットの評価として、液体窒素浸漬での V - I 特性計測を行なった。**Fig. 3.12** に各コイルユニットの 77K での V - I 特性を示す。本試験では、1 A、5 A、10 A…のように段階的に通電を行い、各電流値に保持した時の電圧を計測したので、計測電圧には誘導電圧は含まれていない。図に示したように、磁束フローによる電圧上昇が見られたのは、コイルユニット 2 が 27 A、コイルユニット 3 が 33 A、そしてコイルユニット 4 が 32 A からであった。しかし、いずれのコイルユニットにおいても、大きな電圧発生やクエンチは見られなかった。この結果から、ハンダ接続状態や巻線精度の差と思われる発生電圧の違いはあったが、製作したコイルユニット 2、3 及び 4 が、77 K の温度においてコイルユニット 1 と同等以上の性能を有することを確認した。

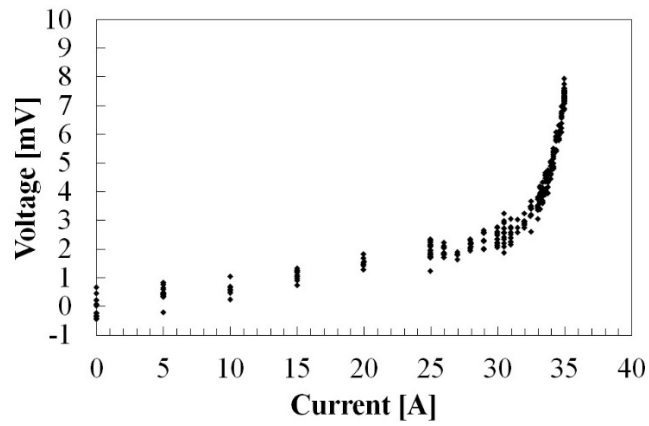
以上より、製作した 4 つのコイルユニットが組込前評価で問題無いことを確認した。そして、これらを使用して YBCO コイルを組み立てた。なお、コイルユニット 1 と 4 を組み合わせて水平軸スプリットコイルとし、コイルユニット 2（上）と 3（下）を組み合わせて垂直軸スプリットコイルとした。



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.12 V - I characteristics of the (a) 2nd, (b) 3rd and (c) 4th coil unit at 77 K.

3.5 YBCO コイルの応力解析

本装置の YBCO コイルは、コイルユニット 4 個で構成された 2 軸のスプリットコイル構造である。そのため、磁場発生時にコイルユニット間に大きな磁気力が発生する。この磁気力によるズレや歪みでコイルユニットがクエンチしたり損傷しないように、補強対策が必要となる。そこで、YBCO コイルの構造設計として応力の数値解析を行なった。この節では、各数値解析結果とその結果から実行した補強方法について述べる。

コイルユニット間の補強対策を検討するために、有限要素法を用いて磁場発生時に生じる応力の数値解析を行なった。**Fig. 3.13** に示したように、解析条件の磁場は、両軸スプリットコイルに通電して 45° 方向 (図の右上方向) の可変磁場 1 T とした。また、補強条件として、YBCO コイル全体が銅製の直方体ブロックに隙間無く収納されているとした。境界条件としては、球体空間の外周部を開放空間とした。

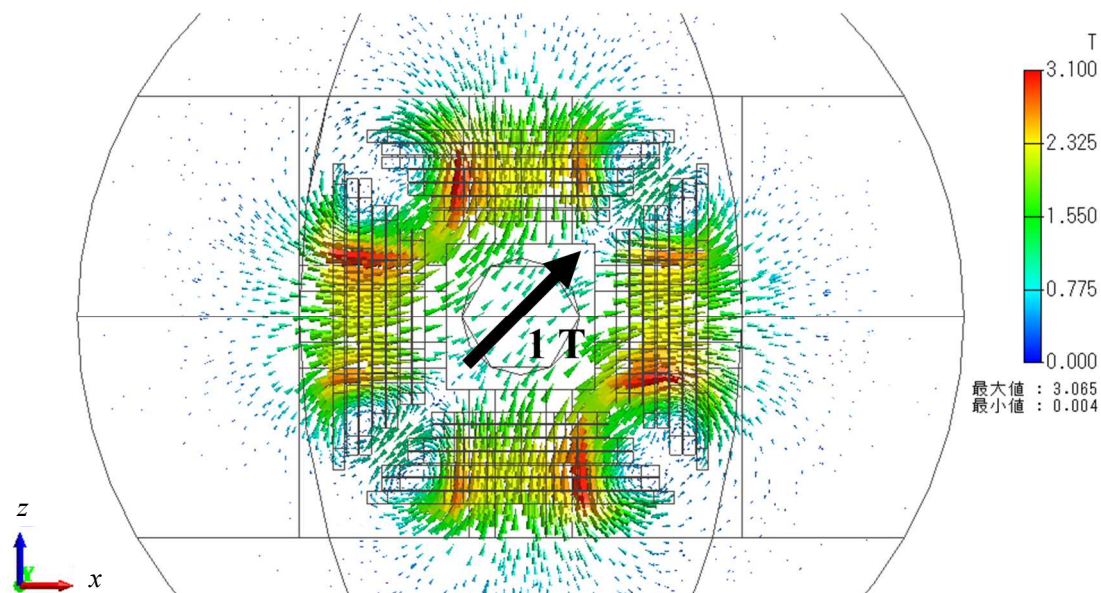


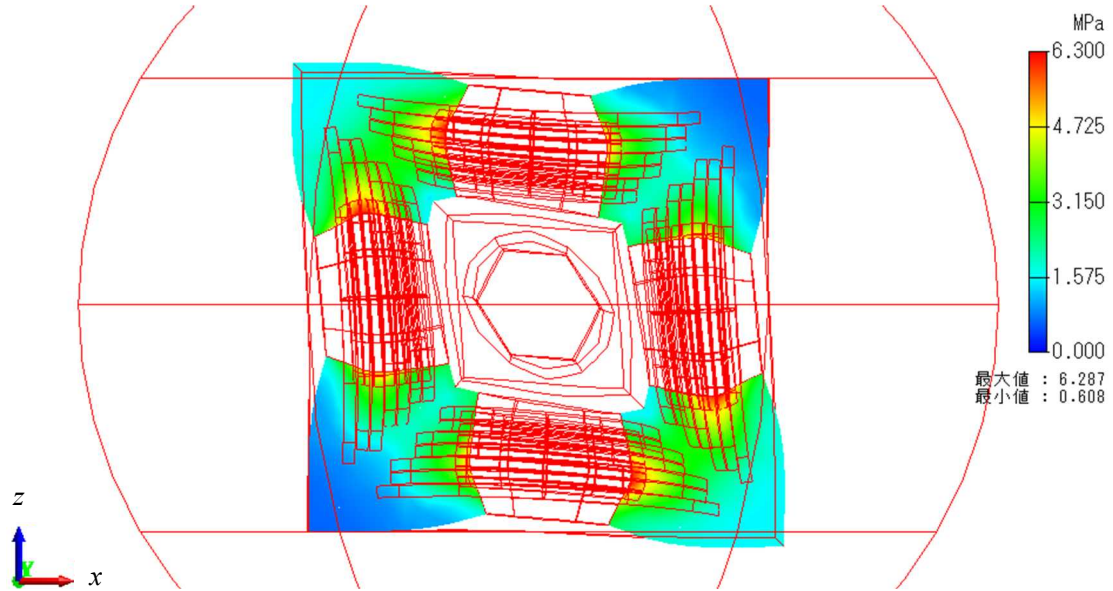
Fig. 3.13 Condition of the magnetic field generated from the YBCO coil in the stress analysis. The coil generates 45-degree vector magnetic field 1 T.

また、銅ブロックの固定壁は拘束無しとして、線材は固定壁に密着しているものとした。そしてメッシュ数は 10 万程度とした。

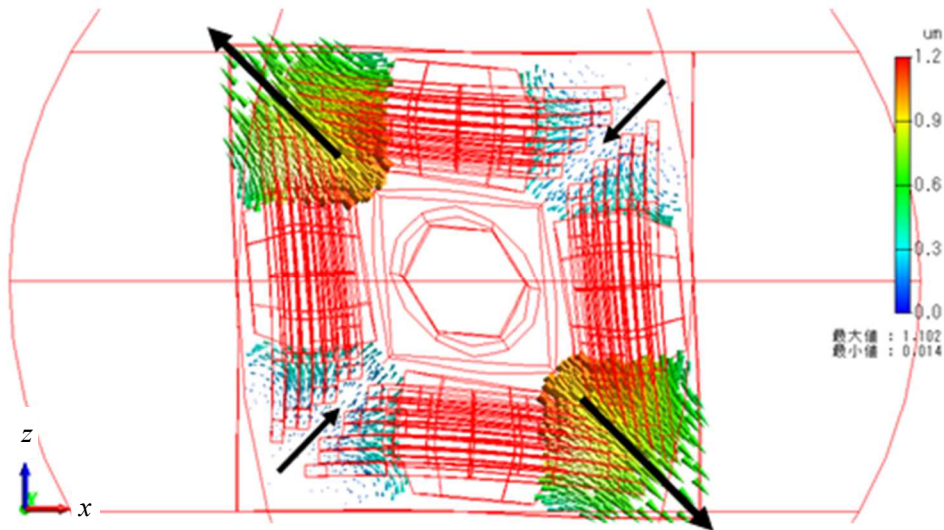
解析結果として、**Fig. 3.14** にミーゼス応力と変位を、**Fig. 3.15** にせん断歪みとせん断応力を示す。**Fig. 3.14 (a)** に示したように、最大ミーゼス応力は 6.3 MPa であり、発生箇所はコイルユニット内側であることが分かった。次に **Fig. 3.14 (b)** から、変位は磁場方向で小さく圧縮して磁場方向と直交した方向に大きく引っ張られるように発生しており、最大変位は $1.2\ \mu\text{m}$ であり、発生箇所は各コイルユニット内側であった。また、**Fig. 3.15** に示したように、最大せん断歪みは最大変位と同じ場所に 8×10^{-5} で発生しており、最大せん断応力は 3.6 MPa であった。

これらの結果から、YBCO コイルを銅製ブロックに収納することで、磁気力による歪みの軽減が十分に可能なことを確認した。

コイルユニット単体での磁気力による歪み軽減対策として、内部パンケーキコイルをコーン型の無酸素銅ケースで押さえつける構造にして、パラフィン含浸を行なった。切削加工の容易さを考慮して、ブロックの材質を銅と強度がそれほど変わらない真鍮とした。また、真鍮製ブロックを囲むように熱伝導及び補強用の無酸素銅製板を設置して、ボックス構造とした。**Fig. 3.16** に製作した真鍮製ブロックの 1/2 の部分を示す。また、**Fig. 3.17** に真鍮ブロック及び無酸素銅製板を装置に組み込んでいる様子を示す。

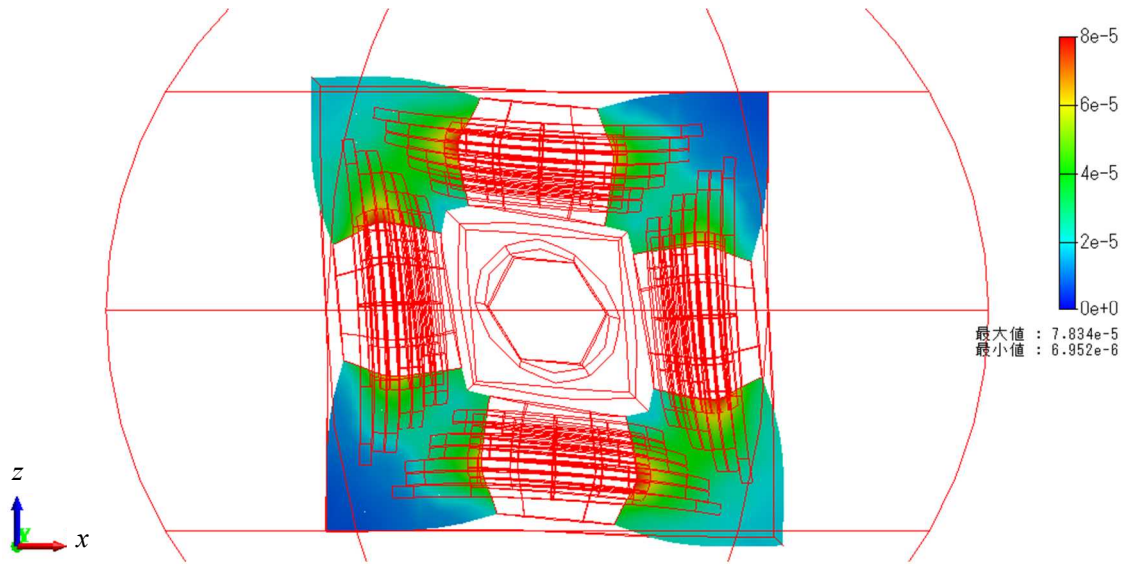


(a)

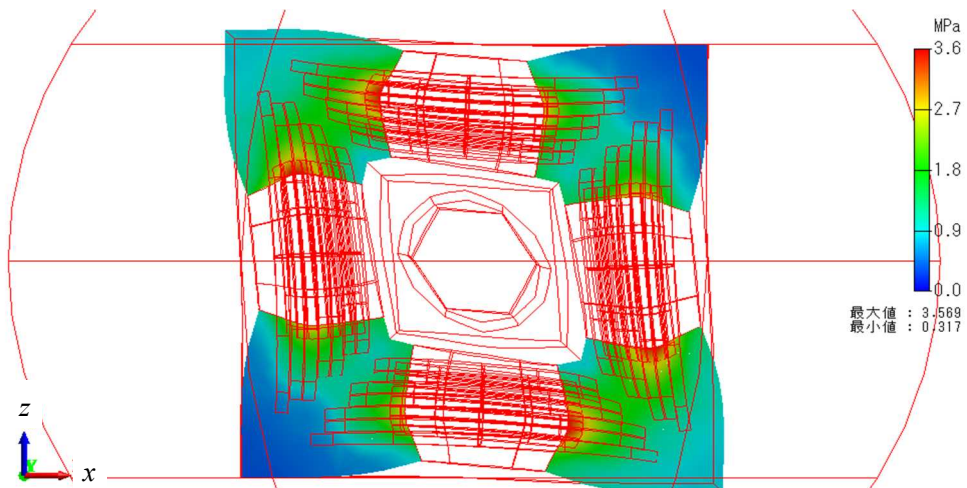


(b)

Fig. 3.14 Numerical analysis results of (a) von Mises stress and (b) displacement when the YBCO coil generates 45-degree vector magnetic field 1 T.



(a)



(b)

Fig. 3.15 Numerical analysis results of (a) shear strain and (b) shear stress when the YBCO coil generates 45-degree vector magnetic field 1 T.

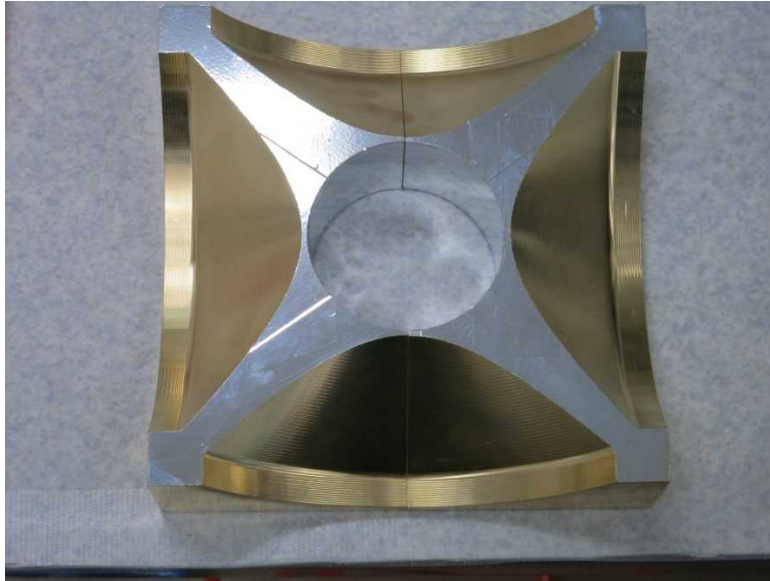


Fig. 3.16 Photograph of the brass support block for the YBCO coil. The block is divided into four pieces to reduce eddy current.



Fig. 3.17 Photograph in installing the brass support block.

3.6 冷却システム熱設計

3.2 節で述べた通り、YBCO コイルの設計運転温度は 30 K としたが、安全性を考慮して YBCO コイルを 20 K 以下、輻射シールドを 60 K 以下で運転することとして、その熱設計を行なった。具体的にはこの温度条件を達成する冷凍機を選定するために、装置についての熱負荷の計算を行なった。

熱負荷を計算するために、YBCO コイルの冷却及び運転機構についての下記のような基本仕様に基づいて行なった。

1. YBCO コイルを無酸素銅製冷却ステージ上に搭載
2. 1.のステージを 4 本の GFRP 製パイプサポートで支持
3. 輻射シールドを 3 本の GFRP 製パイプサポートで支持
4. 冷凍機の各ステージと冷却ステージ及び輻射シールドを
無酸素銅製フレキシブルアンカーで接続
※熱収縮による影響を軽減
5. 輻射シールドを 30 層の断熱輻射材で覆う
6. 2 軸スプリットコイルを個別に運転するために
4 本のパワーリードを設置
室温－冷凍機 1st ステージ : 銅製電流リード
1st ステージ－コイル : 幅 12 mm の YBCO 超電導テープ
線材製電流リード

Fig. 3.18 に、上記の基本仕様を元にした装置内部の模式図と発生する熱負荷を示す。各熱負荷は、冷却ステージを通して冷凍機の各ステージに吸収される。室温－輻射シールド間電流リードは銅製電流リードとした。また、輻射シールド－YBCO コイル間の電流リードは、YBCO 超電導テープ線材製電流リードとした。装置に対する熱負荷は以下となる。

- ・ サポートからの熱伝導 (Q_{cs6} 、 Q_{cs7} 、 Q_{cs8})
- ・ YBCO 超電導テープ線材製電流リードからの熱伝導 (Q_{cy2} 、 Q_{cp})
- ・ 輻射熱 (Q_{r3} 、 Q_{r4})
- ・ 銅製電流リードの熱伝導 (Q_{cc2}) とジュール発熱 (Q_{cj2})
- ・ YBCO コイルのハンダ接続部のジュール発熱 (Q_{jy})

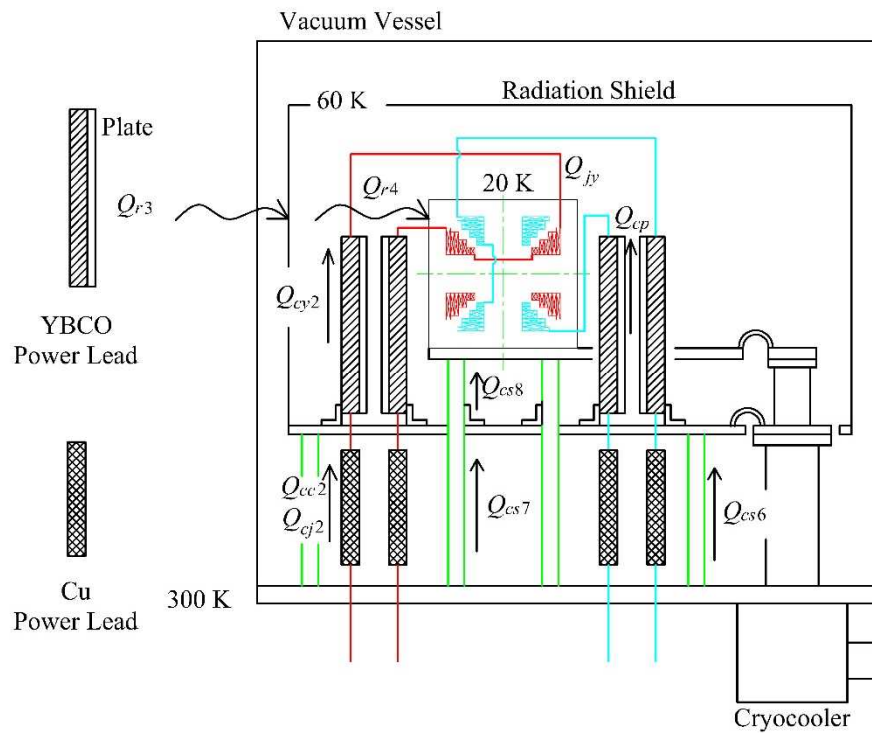


Fig. 3.18 Thermal design of the YBCO vector magnet system.

なお、本装置は真空断熱構造であり、空気を介した冷却部への熱伝達を 0 W とした。また、超電導部の電気抵抗を $0\ \Omega$ とした。

YBCO コイルのハンダ接続部のジュール発熱について、3.3.3 項で述べたように 1 つのコイルユニットの電気抵抗値は $11.5\ \mu\Omega$ なので、 100 A 通電時に YBCO コイル（コイルユニット×4）に発生するジュール発熱 Q_{jy} は

$$Q_{jy} = 4 \times 11.5 \times 10^{-6} \times (100)^2 = 0.46\text{ W}$$

となる。

次に熱伝導計算を行なった。温度条件として室温を 300 K 、輻射シールド（冷凍機 1st ステージ連結）を 60 K 、YBCO コイル（冷凍機 2nd ステージ連結）を 20 K とした。

輻射シールドへの熱伝導 Q_{c3} は、輻射シールドを支持する GFRP 製サポートパイプ 3 本(Q_{cs6})と YBCO コイルを支持する GFRP 製サポートパイプ 4 本(Q_{cs7})からとなる。そして、YBCO コイルへの熱伝導 Q_{c4} は、YBCO コイルを支持する GFRP 製サポートパイプ 4 本(Q_{cs8})、YBCO 超電導テープ線材製電流リード 4 本(Q_{cy2})及びその補強板 4 枚(Q_{cp})からとなる。そして、各構造体の仕様と(2-1)式及び **Table. 2.3** を用いて算出した熱伝導計算値を **Table. 3.4** に示す。なお、電流リードに使用した YBCO 超電導テープ線材には 0.04 mm 厚の銅安定化層があり、 $20 - 60\text{ K}$ 間ではこの銅層が熱伝導の 98%以上を占める。よって、銅安定化層の熱伝導を YBCO 超電導テープ線材製電流リードの熱伝導とした。

Table. 3.4 Calculated heat conduction of instruments in the YBCO vector magnet system

	Material	Specifications of cross section	Length between 300 and 60 K [mm]	Length between 60 and 20 K [mm]	Number	Calculated heat conduction Q
Support for radiation shield	GFRP	Pipe ϕ 23-16	50		3	(300-60K) Q_{cs6} 1.2 W
Support for YBCO coil	GFRP	Pipe ϕ 23-16	50	106	4	(300-60K) Q_{cs7} 1.7 W
						(60-20 K) Q_{cs8} 0.04 W
YBCO Current Lead	YBCO tape conductor	Plate 0.1×12		200	4	(60-20 K) Q_{cy2} 0.43 W
Reinforced Plate	SUS	Plate 1×15		200	4	(60-20 K) Q_{cp} 0.06 W

表より、輻射シールド(60 K)への熱伝導計算値 Q_{c3} と YBCO コイル(20 K)への熱伝導計算値 Q_{c4} はそれぞれ以下の通りとなった。

$$Q_{c3} = Q_{cs6} + Q_{cs7} = 1.2 + 1.7 = 2.9 \text{ W}$$

$$Q_{c4} = Q_{cs8} + Q_{cy2} + Q_{cp} = 0.04 + 0.43 + 0.06 = 0.53 \text{ W}$$

次に輻射熱の計算を行なった。温度条件は、熱伝導計算での条件と同じとして、輻射シールドは 30 層の断熱輻射材で覆われているとした。輻射シールドを直径 480 mm、高さ 400 mm の円筒として、YBCO コイルの寸法を 1 辺 168 mm の直方体とした。この条件と(2-2)式より、輻射シールドへの輻射熱計算値 Q_{r3} と YBCO コイルへの輻射熱計算値 Q_{r4} は以下のとおりとなった。

$$Q_{r3} = 7.5 \text{ W}$$

$$Q_{r4} = 0.1 \text{ W}$$

そして、本装置の銅製電流リードの最適設計を行なった。条件は以下の通りである。

材質	: 銅
I	: 100 A (45° 1 T 可変磁場発生時)
T_{a3}	: 300 K
T_{b3}	: 60 K
k	: 400 W/mK
ρ	: $1.8 \times 10^{-8} \text{ } \Omega/\text{m}$

なお、熱伝導率と比抵抗は温度依存の物性値だが、計算の簡便化のために、中間温度での物性値を使用した。

上記の銅製電流リード条件と(2-10)式から最小熱量となる S/L は

$$\frac{S}{L} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ [m]}$$

となった。この結果から、銅製電流リードの断面積 S を 10.8 mm^2 、長さ L を 400 mm とした。そして、 100 A 通電時に銅製電流リードに発生する熱量は、(2-9)式、銅製電流リード条件及び S/L の計算結果から 4.8 W となった。本装置に使用する電流リードは 4 本であり、 45° 1 T 可変磁場発生時には 4 本全てに 100 A を通電するので、この時の銅製電流リードの総熱量($Q_{cc2}+Q_{cj2}$)は 19.2 W となる。

これらの計算から、 60 K の輻射シールドの総熱負荷計算値 Q_{h3} と 20 K の YBCO コイルの総熱負荷計算値 Q_{h4} はそれぞれ以下の通りとなった。

$$Q_{h3} = Q_{c3} + Q_{r3} + (Q_{cc2}+Q_{cj2}) = 2.9 + 7.5 + 19.2 = 29.6 \text{ W}$$

$$Q_{h4} = Q_{c4} + Q_{r4} + Q_{jy} = 0.53 + 0.1 + 0.46 = 1.09 \text{ W}$$

そして、製作上の誤差を考慮して安全率を 3～4 割として、 60 K の輻射シールドへの総熱負荷は 40 W 、 20 K の YBCO コイルへの総熱負荷は 1.5 W であると仮定した。この結果から、商用電源周波数 50 Hz での 1st ステージの 60 K での能力が 90 W 、2nd ステージの 20 K での能力が 6 W である 2 段式冷凍機を用いると、十分な冷却ができるものと見積もった。なお、冷却能力の余剰分は冷却時間短縮に役立つものと考え、この仕様を満たす冷凍機を採用した。

以上述べてきた熱負荷の計算結果と熱流入経路及び冷凍機の冷凍能力を記載した本装置の模式図を **Fig. 3.19** に示す。

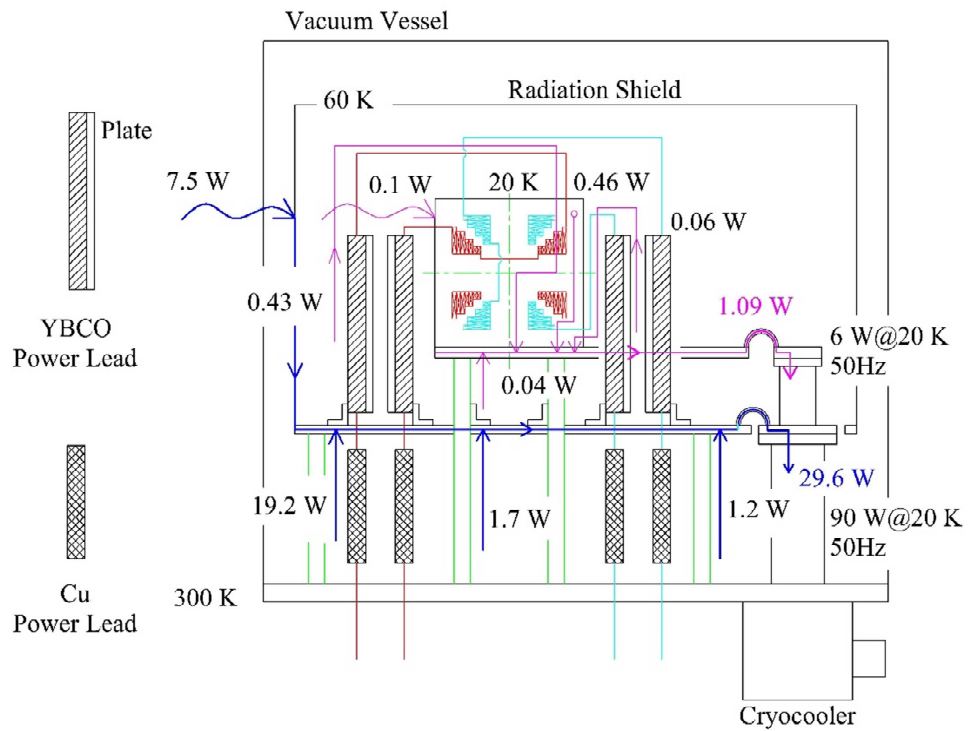


Fig. 3.19 Calculated heat loads to the YBCO vector magnet system.

3.7 装置の構造

3.6 項で述べた YBCO コイルの冷却及び運転機構と熱設計を元に、YBCO コイルを搭載した XMCD 計測用 YBCO ベクトルマグネット装置を組み立てた。**Fig. 3.20** 及び **Fig. 3.21** に、開発した XMCD 計測用 YBCO ベクトルマグネット装置の概略図及び外観写真を示す。図に示したように、YBCO コイルを搭載したクライオスタットに XMCD 計測用の試料実装チャンバー、マニピュレーター、試料回転機構及び液体ヘリウムフロー式計測プローブを接続して本装置を完成させた。

YBCO コイルを収納した 2 段式冷凍機搭載のクライオスタットはステンレス製であり、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Pa 以下の真空度を保持できる。この寸法は外径 650 mm、高さ 545 mm とした。YBCO コイルの重量は約 12 kg であり、コイルを補強する無酸素銅及び真鍮製補強用ボックスの重量は約 23 kg である。輻射シールドの材質は、軽量化のために純アルミニウム製とした。YBCO コイル中心に位置する試料空間へ 3 方向からのアクセスを行うために、試料導入用ボア、X 線照射用ボア及び上下観測用ボアの 3 軸の室温ボアを設けた。この 3 軸室温ボアの内面に電解研磨を施して、XMCD 計測時に必要な 9.9×10^{-7} Pa 以下を保持する超高真空仕様とした。試料導入用ボアの一方は内径 39.4 mm として、もう一方は、目視観測を簡便にするためにテーパ形状にして、内径 97.4 mm とした。X 線照射用ボア及び上下観測用ボアは、それぞれ YBCO コイルの垂直軸上及び水平軸上に位置させた。これらのボアの内径を 23.9 mm とした。**Fig. 3.22** に、本装置における XMCD 計測の模式図を示す。試料は x 軸方向で試料空間に導入され、 x 軸周りに回転が可能である。円偏光 X 線は、 y 軸方向に照射される。方向可変磁場は y - z 平面上に発生する。これにより、任意方向の磁場と X 線によって、試料界面の XMCD 計測が可能となっている。

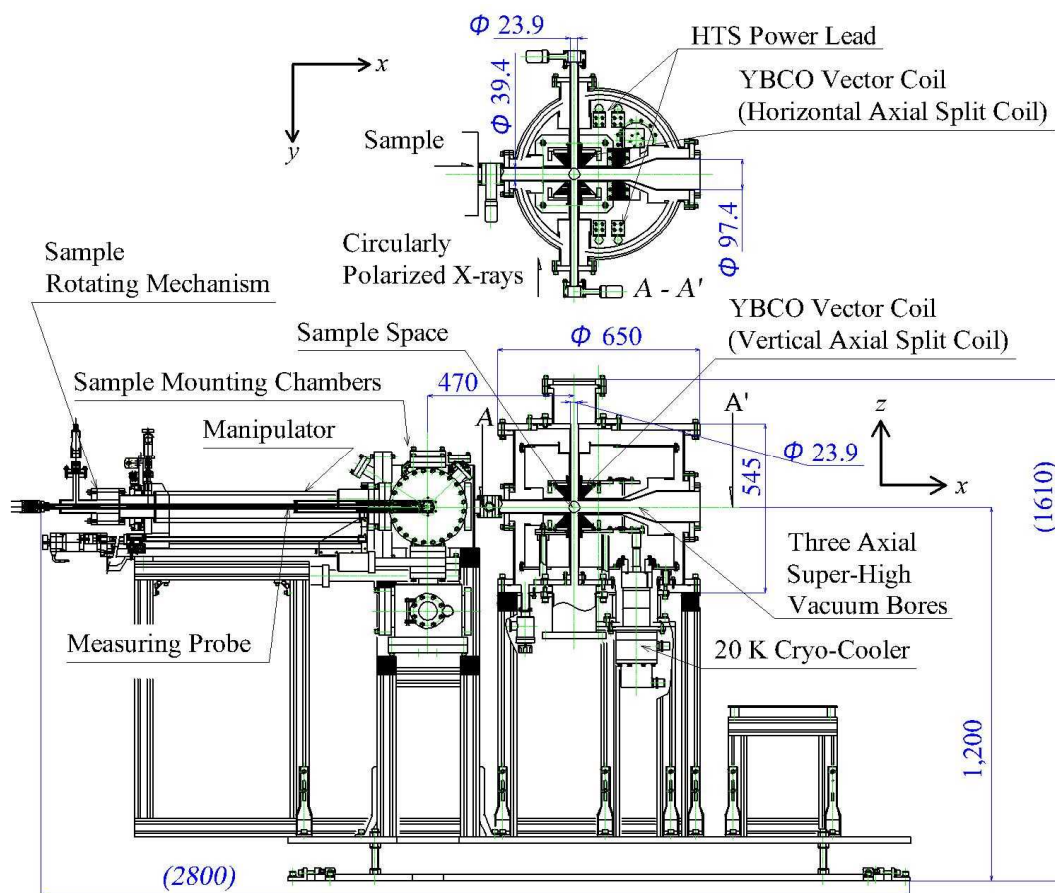


Fig. 3.20 Outline drawing of the cryocooled YBCO vector magnet system. Vertical and horizontal cross-sectional views are shown.



Fig. 3.21 Photograph of the newly developed system. Circularly polarized X-rays are delivered in the direction of the arrow.

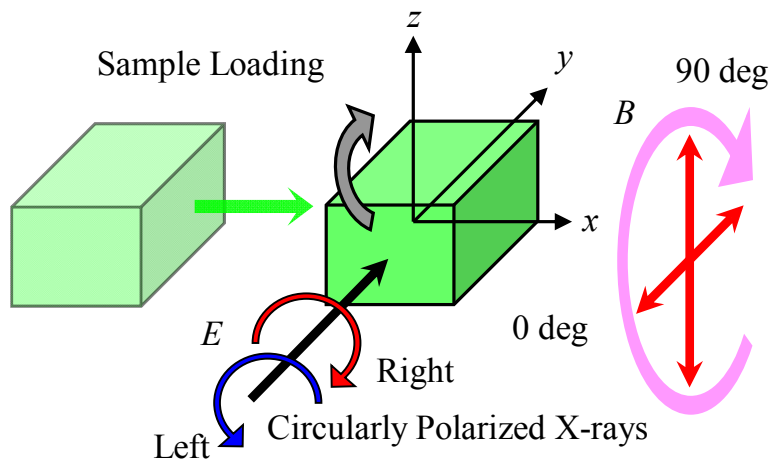


Fig. 3.22 Schematic diagram of the XMCD measurements using the developed system. The circularly polarized X-rays are delivered along the direction of the 0-degree magnetic field vector.

3.8 性能確認試験

この節では、本装置の組立段階及び完成後に行なった性能確認試験について述べる。まず、YBCO コイル搭載前の本装置単体で冷却及び通電を行い、通電による発熱に関わらず、各温度が設計温度以下に保持されるかを確認した（3.8.1 項）。次に、YBCO コイルを搭載して完成させた本装置の冷却を行い、最低到達温度までの冷却時間を確認した（3.8.2 項）。そして、YBCO コイルの励磁試験を行い、設計通りの方向可変磁場を発生することが出来るかを確認した。また、一定時間励磁し続けて、長時間の励磁が可能であるかを確認した（3.8.3 項）。

3.8.1 YBCO コイル搭載前の冷却性能試験

本装置運転時に最大熱負荷状態となるのは、4 本のパワーリードに 100 A を通電した時である。そこで、本装置の冷却性能を確認するために、水平軸スプリットコイルのみを搭載した状態で本装置の冷却を行って、4 本のパワーリードに 160 A 通電した時の各温度変化を計測した。**Fig. 3.23** に示すように、水平軸スプリットコイル及び輻射シールドは、非通電状態でそれぞれ 9.4 K 及び 42.2 K まで冷却された。そして、160 A 通電を 1.9 時間行なった時のそれぞれの到達温度は、10.2 K 及び 49.4 K であった。これらの結果は、設計温度（20 K 及び 60 K）以下であり、本装置が YBCO コイルを運転するための冷却性能を有することを確認した。

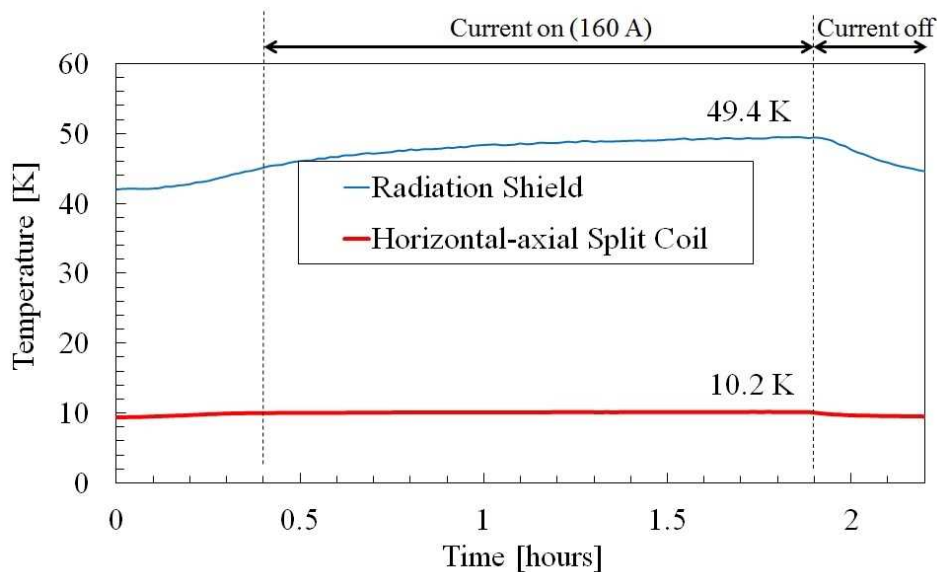


Fig. 3.23 Cooling performance test results of the system with only horizontal-axial split coils in applying 160 A to four power leads.

3.8.2 完成した装置の冷却試験

YBCO コイルを搭載して完成した装置の冷却試験を行なった。試験結果を **Fig. 3.24** に示す。冷却試験の結果、水平、垂直軸スプリットコイル及び輻射シールドは、9.5 K、9.2 K 及び 43.5 K に冷却され、設計仕様を十分に満足した。また、冷却時間は 52 時間であった。

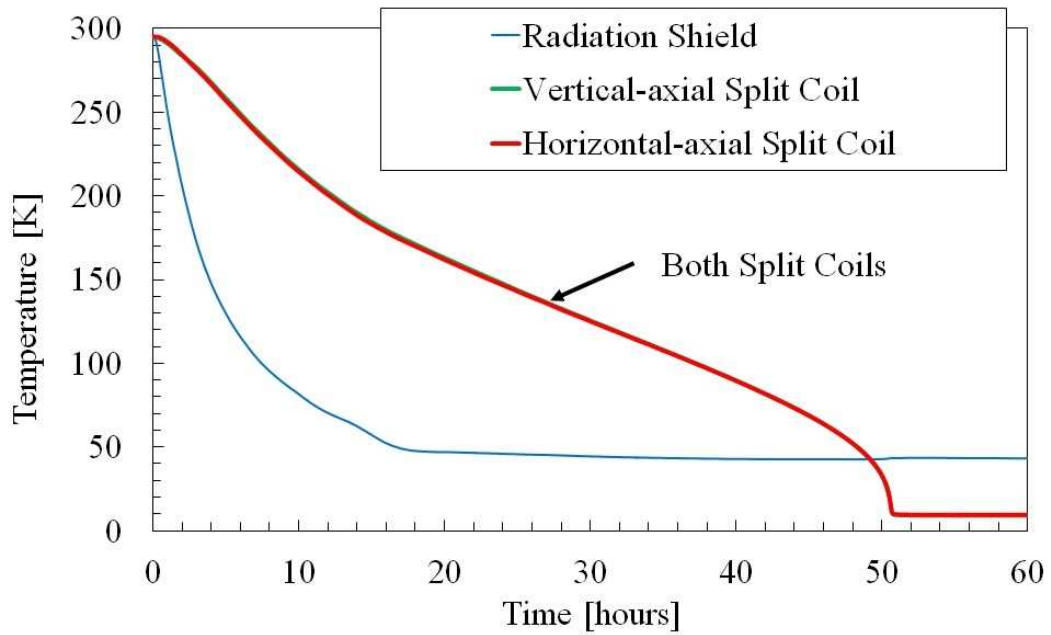


Fig. 3.24 Cooling test results of the system.

3.8.3 完成した装置の励磁試験

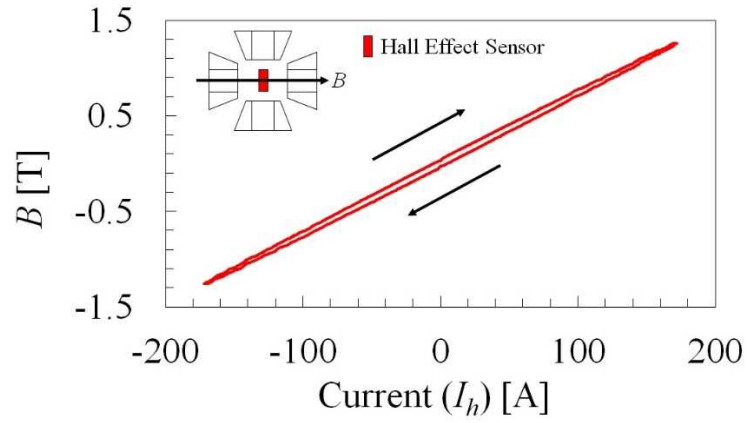
本装置の冷却後、ホール素子を用いて、本装置の試料空間中心で 0° 、 45° 及び 90° 方向に発生させたそれぞれの磁場の計測を行なった。いずれも励磁速度は、 0.29 A/s であった。**Fig. 3.25** に磁場計測結果を示す。**Fig. 3.25 (a)** は、水平軸スプリットコイルのみに通電（電流値 I_h ）した時に発生した 0° の方向可変磁場であり、**Fig. 3.25 (b)** は両軸のスプリットコイルに同時通電した時に発生した 45° の方向可変磁場である。そして、**Fig. 3.25 (c)** は、垂直軸スプリットコイルのみに通電（電流値 I_v ）した時に発生した 90° の方向可変磁場である。なお、**Fig. 3.25 (b)** に示した $(I_h^2 + I_v^2)^{1/2}$ は、水平及び垂直軸スプリットコイルへの通電電流 I_h 及び I_v の合成ベクトルの大きさを示す。これらの結果から、いずれの角度でも、本装置が $\pm 140 \text{ A}$ で $\pm 1 \text{ T}$ 、 $\pm 170 \text{ A}$ で $\pm 1.2 \text{ T}$ の方向可変磁場を発生可能なことを確認した。

次に 0° 、 45° 及び 90° の方向可変磁場 1.2 T を発生させた時のコイルの電圧変化を **Fig. 3.26** に示す。この時の励磁速度は、 0.29 A/s であった。いずれの場合も、スプリットコイルの誘導起電力は約 28 mV であった。この値からコイルユニットの自己インダクタンスを算出すると 48.3 mH であり、3.3.2 項で示したコイルユニットの自己インダクタンス 48 mH とほぼ同等の値である。**Fig. 3.26 (b)** に示したように、最大負荷状態となる 45° の方向可変磁場 1.2 T を発生させた時、水平及び垂直軸スプリットコイル電圧は、初期励磁を除いた励磁過程において上昇傾向にあった。しかし、 170 A 到達後には 1.9 mV 及び 4.0 mV に安定した。励磁過程における電圧の増加は、ほぼ直線的なことから、線材のハンダ接続による抵抗が影響したものと推測する。

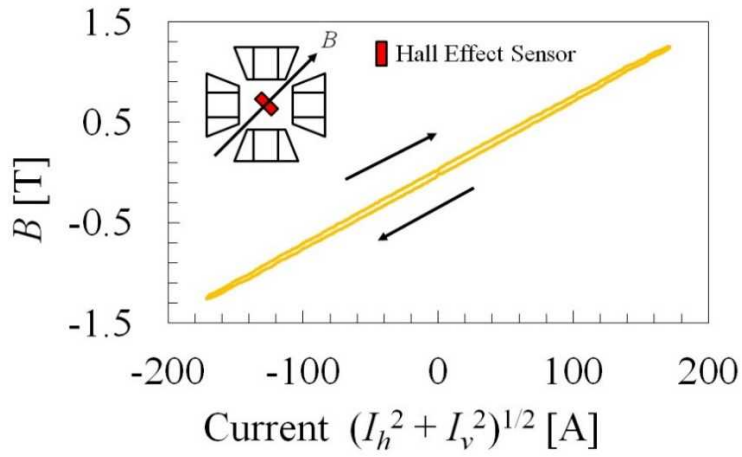
そして、最大負荷状態となる 45° の方向可変磁場 1.2 T を発生させて、長時間その状態を保持した時の温度変化を **Fig. 3.27** に示す。各スプリットコイル及び輻射シールドは、3.3 時間後で 10.5 K 、 10.2 K 、 47.3 K に安定した。結果から、本装置の YBCO コイルは最大負荷状態においても、安定して十分な性能を発揮することを確認した。

以上の一連の励磁試験の結果から、XMCD 計測のために本装置が安定的に運転可能であることが確認された。

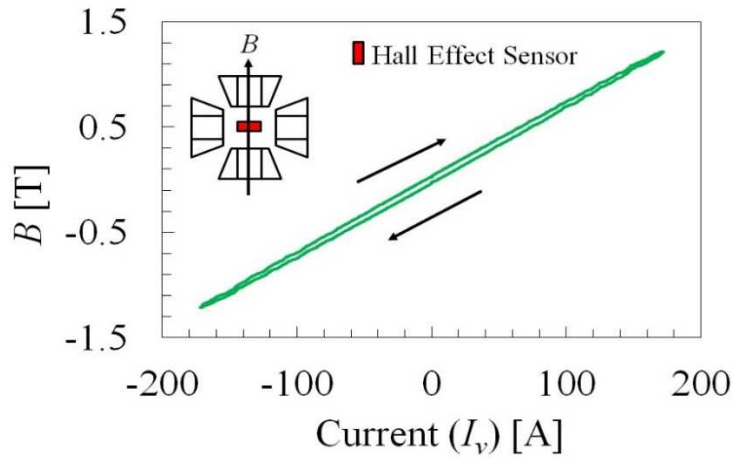
なお、磁場ヒステリシスについては、現状の XMCD 計測においては問題ない程度の大きさであった。**Fig. 3.25** において、通電電流範囲を ± 2 A に拡大した場合の図を **Fig. 3.28** に示す。図に示したように、励磁及び減磁過程後に 0 A で ± 0.03 T のヒステリシスが見られた。これは YBCO テープ導体内で発生した遮蔽電流によるものと考えられる。この磁場ヒステリシスにより、試料空間中心の磁場角度に誤差が生じるが、現在の XMCD 計測においては問題とならない程度であった。より高い精度の角度設定が必要となる場合は、ヒステリシスを考慮して通電電流を設定するなどの対策が必要となるが、これは今後の課題としたい。



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.25 Vector magnetic fields measured at the center of the sample space. The magnetic field directions are (a) 0, (b) 45 and (c) 90 degrees, respectively.

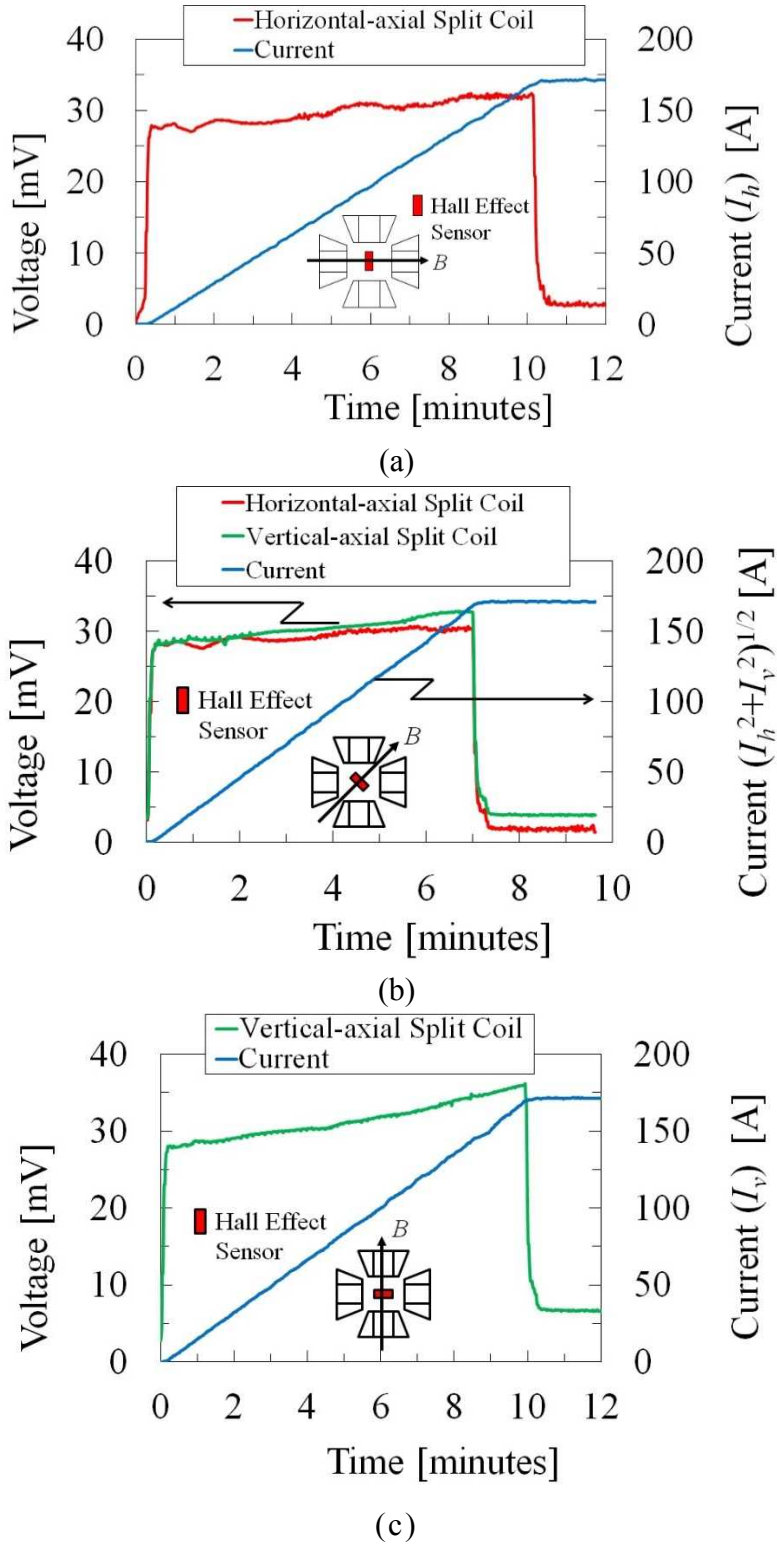


Fig. 3.26 Voltages across the YBCO coil in generating the magnetic field of 1.2 T. The magnetic field directions are (a) 0, (b) 45 and (c) 90 degrees, respectively.

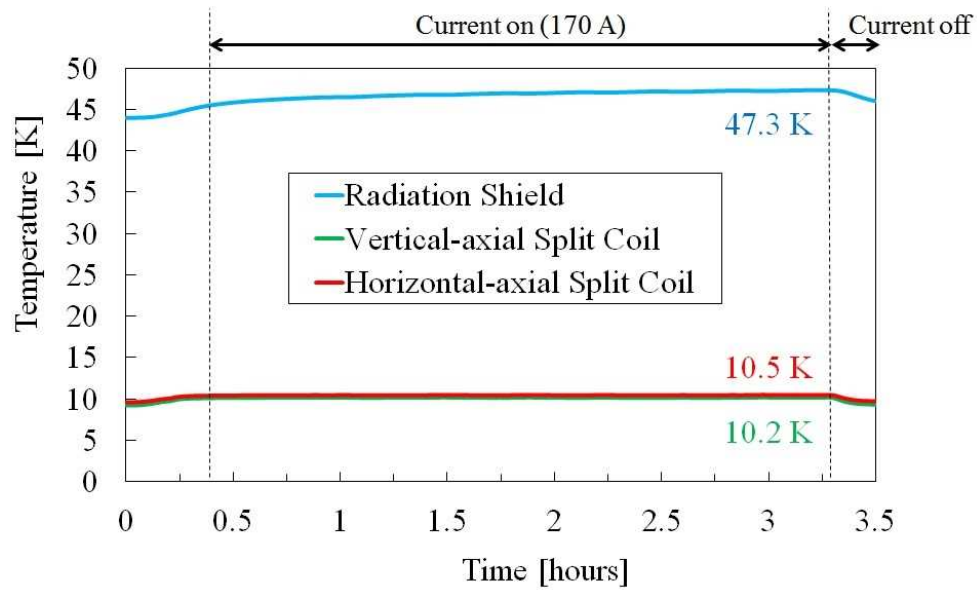
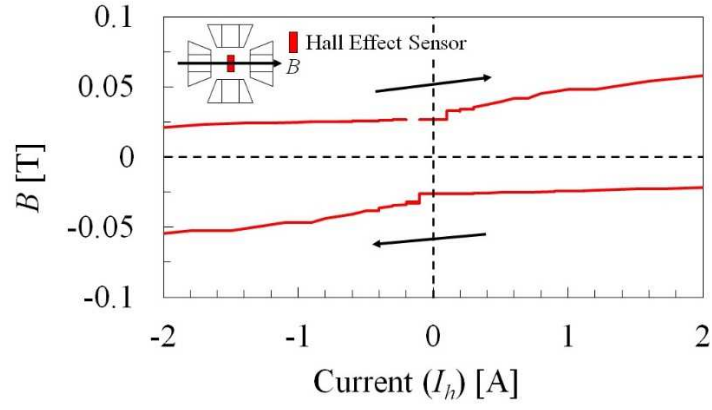
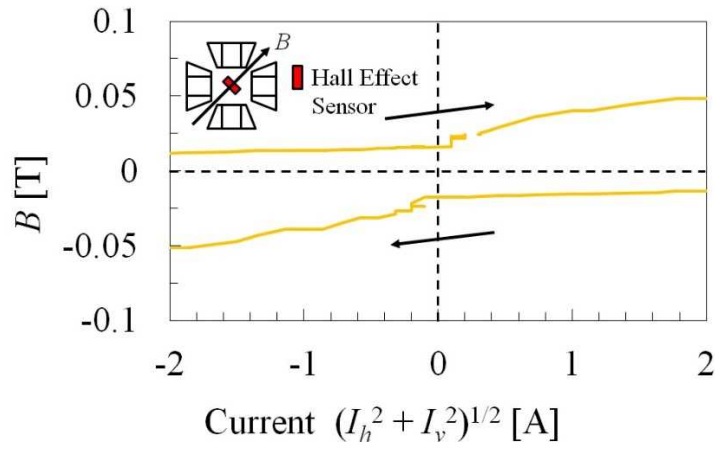


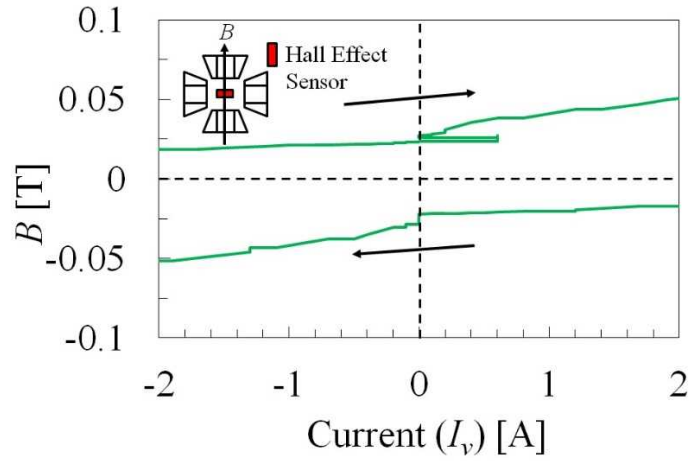
Fig. 3.27 Continuous current test results in generating the 45-degeree magnetic field of 1.2 T.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.28 Hysteresis of the magnetic field of the center of the sample space. The magnetic field directions are (a) 0, (b) 45 and (c) 90 degrees, respectively.

3.9 XMCD 計測

開発した装置が XMCD 計測可能であるか確認するために、これを大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設フォトンファクトリーに設置して XMCD 計測を試みた。

計測試料は、性質が事前に分かっている $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜を用いることで計測できたかどうかの確認を行なった¹⁰⁾。Fig. 3.29 に XMCD スペクトル計測の模式図を示す。X 線照射方向に対して 45° 傾けた試料に、 θ_B -15° から $+115^\circ$ 方向の磁場 B を印加し、各角度での XMCD スペクトルを計測した。Fig. 3.30 に示したように、磁場角度の変化に伴い、XMCD スペクトルの強度（磁化の光軸方向成分）が減少し、磁場方向 θ_B が $+60^\circ$ から $+65^\circ$ の時に、XMCD スペクトルがほぼ 0 となって反転することが観測された。XMCD 強度がほぼ 0 になったということは、光軸に平行な方向の磁化がほぼ消失したこと、すなわち磁化が光軸と垂直になったことを示している (Fig. 3.31)。

通常、外部磁場と光軸が垂直になった時に XMCD 信号が消失するはずだが、 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜は面内に磁化容易軸を持つので、磁化は外部磁場よりも面内に向く傾向がある。そのため、外部磁場が薄膜面に対して垂直より浅い角度で磁化と光軸が垂直になったものと考えられる。このように、本装置は XMCD の計測が可能であり、磁場角度依存性を計測することも可能であることが示された。これによ

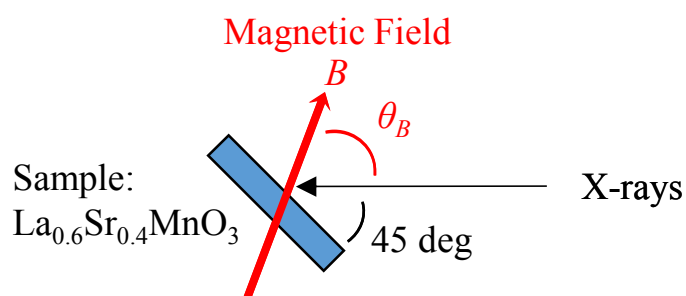


Fig. 3.29 Schematic diagram of the XMCD measurement of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$.

って試料の磁気異方性が調べられ、新規 XMCD 計測に有用であることも確認された。

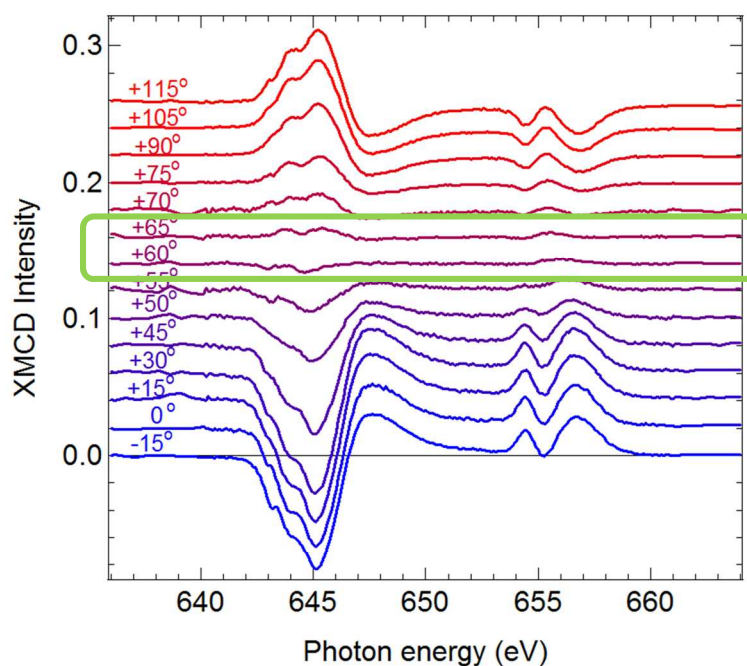


Fig. 3.30 Magnetic field angle dependence of the XMCD spectra of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$. The XMCD reversed at +60- to +65-degree vector magnetic fields.

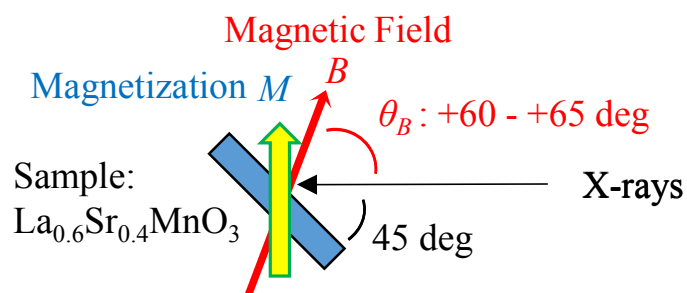


Fig. 3.31 Schematic diagram of results obtained from the XMCD measurement of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$. Magnetization M became normal to the X-ray direction when θ_B was +60 to +65 degree.

3.10 コイルユニット焼損とその修復

今回開発した YBCO コイルは 2 軸のスプリットコイル構造であり、YBCO 超電導テープ線材を用いたコイルとして、他に前例が無い。2.5 項で述べた通り、励磁中には、YBCO 超電導テープ線材に大きな応力が発生する。YBCO 超電導テープ線材の板厚は、安定化材や補強材を含めても 0.1 mm と非常に薄い。そのため、応力対策を十分に施しておかないと、ダメージが顕著に現れることが予想される。また、開発した YBCO コイルは、冷凍機による伝導冷却仕様のため、パンケーキコイル間に熱伝導促進のための銅円板を設置している。銅円板表面には、電気絶縁用のポリミドシートを貼り付けているが、熱伝導を考慮して非常に薄いシートを使用している。よって、応力によるシートの電気絶縁破壊の可能性も議論する必要がある。こういった問題を十分に考慮してコイル製作を行う必要があるが、それでも、コイルにダメージが生じてしまうケースがある。そういった場合に対処が出来るように、ダメージに対する修復方法や技術の構築が、今後の YBCO コイル開発の鍵にもなってくるので、それに関連した内容をこの節では紹介する。

装置完成後、運転中に YBCO コイルに損傷が起こる事態が発生した。本節では、損傷が起こった時の状況、行なった修復方法及び修復後の評価について述べる。

3.10.1 焼損状況及び修復

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設フォトンファクトリー内にて、本装置の垂直軸スプリットコイルを励磁中に約 100 A で急激な電圧上昇が発生したため、運転を中止した。これ以降、通電電流約 25 A の時に、励磁電源で設定したリミット電圧に達するようになった。垂直軸スプリットコイルの

各コイルユニットの発生電圧を計測した結果、通電電流約 25 A で下側のコイルユニット 3 に電圧が発生していることが分かった。また、垂直軸スプリットコイルの地絡を計測した結果、抵抗値は約 $2\ \Omega$ となっていた。これらの結果より、コイルユニット 3 内部や口出し部に破損や劣化し、垂直軸スプリットコイルの電流経路に絶縁不良が発生していることが推測された。そこで、本装置を解体し、コイルユニット 3 の破損状況の確認及び修復作業を行なった。

装置を解体して、YBCO コイル周辺の破損状況を確認した結果、コイルユニット 3 と Y 系超電導テープ線材製電流リードのハンダ接続部が剥離していることが分かった。これにより、励磁中に電圧が発生したことが推測された。

次に、コイルユニット 3 の内部に破損が発生しているかを確認するために、液体窒素中で V - I 特性計測を行なった。**Fig. 3.32** に計測結果を示す。結果として、33 A 付近から電圧上昇が見られた。**Fig. 3.12 (b)** に示したコイルユニット 3 製作時に計測した V - I 特性と同様だったので、 I_c は減少していないことを確認した。

そして、コイルユニット 3 の地絡を計測した結果、抵抗値は約 $2\ \Omega$ であった。装置内部の電流リードや計測線等には絶縁不良は見られなかったので、コイルユニット 3 のみに絶縁不良が発生していることが分かった。そこで、コイルユニット 3 を分解して、内部状態を確認したところ、**Fig. 3.33** に示したように、最外層パンケーキコイル #7 の内径側に焼損が発生し、それに接する銅円板のポリミド絶縁部に焼損による絶縁破壊が発生していたことが分かった。**Fig. 3.12 (b)** に示したコイルユニット 3 の 77 K における V - I 特性において、発生電圧が他のコイルユニットより大きく、装置運転時も垂直軸スプリットコイルの発生電圧は、水平軸スプリットコイルよりも大きかった。これらの状況から、今回発生した焼損の原因となる劣化等が、製作時から発生していた可能性があると推測した。

これらの結果より、ユニットコイル 3 の修復作業を行なった。焼損のあった最下層コイルを解いて、焼損および変色のあった部分より内側の線材(3 m)を除去して巻き直しを行なった。除去して短くなった分は、継ぎ足し用線材を巻き直した線材の後ろにブリッジ接続

して、同じ巻き数となるようにした。また、口出し部のハンダ接続箇所が剥離するのを防ぐため、接続箇所を圧接できるように押さえ板を改良した。

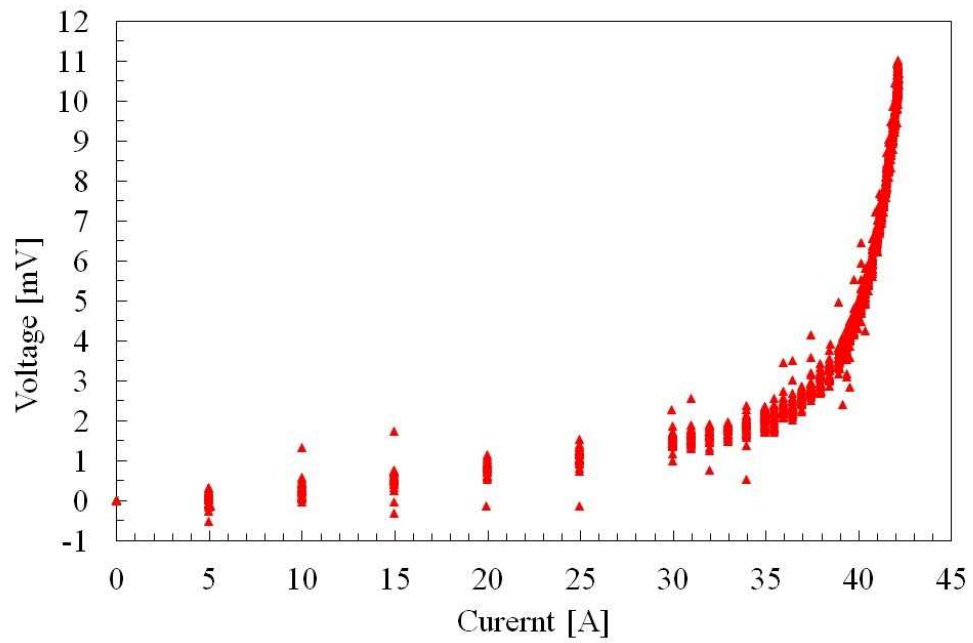
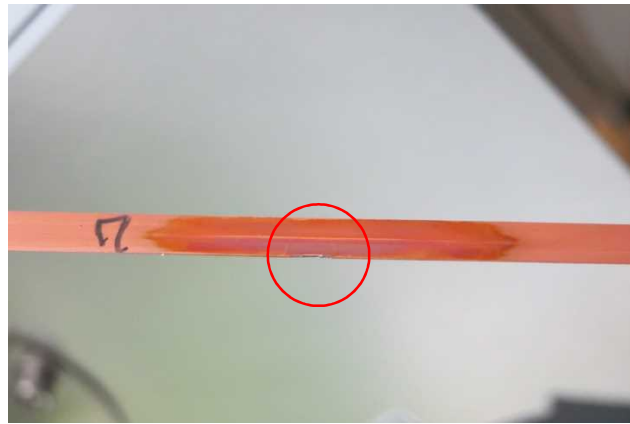


Fig. 3.32 V - I characteristics of the 3rd and coil unit at 77 K after the system trouble.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.33 Photograph of the fire damaged (a) pancake coil #7 and (b) YBCO tape conductor and (c) copper disk in the 3rd coil unit.

3.10.2 修復後の試験

Fig. 3.34 に、修復したコイルユニット 3 を液体窒素に浸漬して、 V - I 特性を計測した結果を示す。比較として、修理前の V - I 特性も示してある。結果として、35 A 付近から電圧上昇が見られ、電圧上昇前の電圧は 1 mV 以下であった。これは、修復前よりも良い結果となった。また、 V - I 特性計測後にコイルユニット 3 の地絡を計測した結果、絶縁状態を保持していることを確認した。

修復したコイルユニット 3 を用いて装置の再組立を行なった。再組立後に、コイルユニット 3 に異常がみられないかを確認するために、通電試験を行なった。**Fig. 3.35** に両軸スプリットコイルに 170 A 通電した時の発生電圧を示す。手順としては、始めに、水平軸コイルユニットに 170 A 通電 (0° 方向磁場 1.2 T) した。その状態で垂直軸コイルユニットに 170 A 通電して、両軸スプリットコイルに 170 A が同時通電されている状態とした。この時の励磁速度は、0.29 A/s であった。結果として、垂直軸コイルユニットの誘導電圧は 28 mV で、

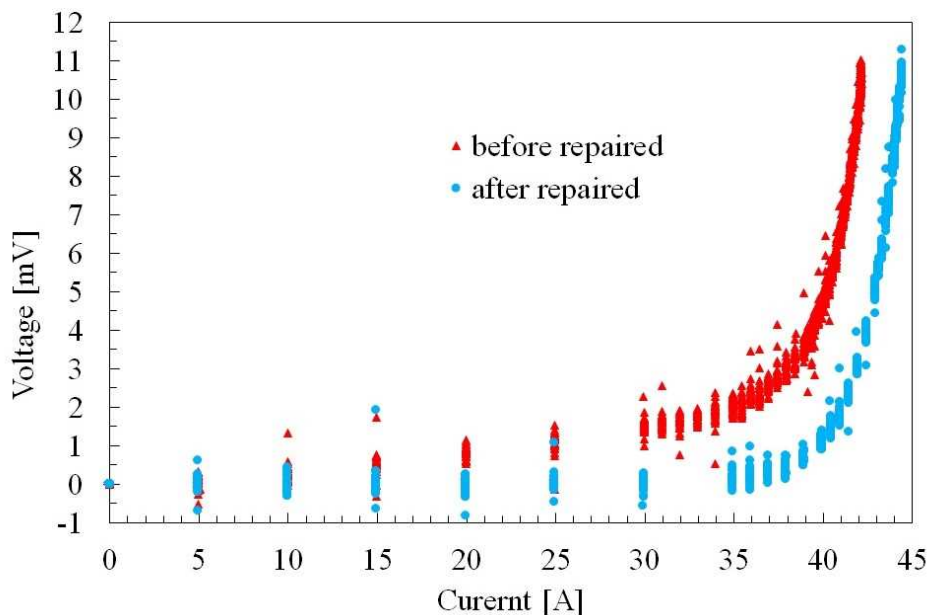


Fig. 3.34 V - I characteristics of the repaired 3rd coil unit at 77 K. For comparison, V - I characteristics of the 3rd coil unit before repaired is also shown.

定常電圧は 3.4 mV となり、水平軸コイルユニットによる磁場 (0° 方向磁場 1.2 T) の影響も無く、問題なく通電できたことを確認した。よって、修復したコイルユニット 3 を再組込した本装置が、故障前と同等以上の性能を得ていることを確認した。

以上より、修復作業で故障前と同等以上の性能を得ることが出来た。コイルユニット単体評価で、今回焼損が発生したコイルユニット 3 が他のコイルユニットと発生電圧に違いがあったということが、トラブルの可能性を示唆していたと言える。今回のように焼損の範囲が小規模の場合、その部分のみを切除して接続し直すことで、性能を回復できることが分かったことは、YBCO コイルの今後の開発に役立つ。

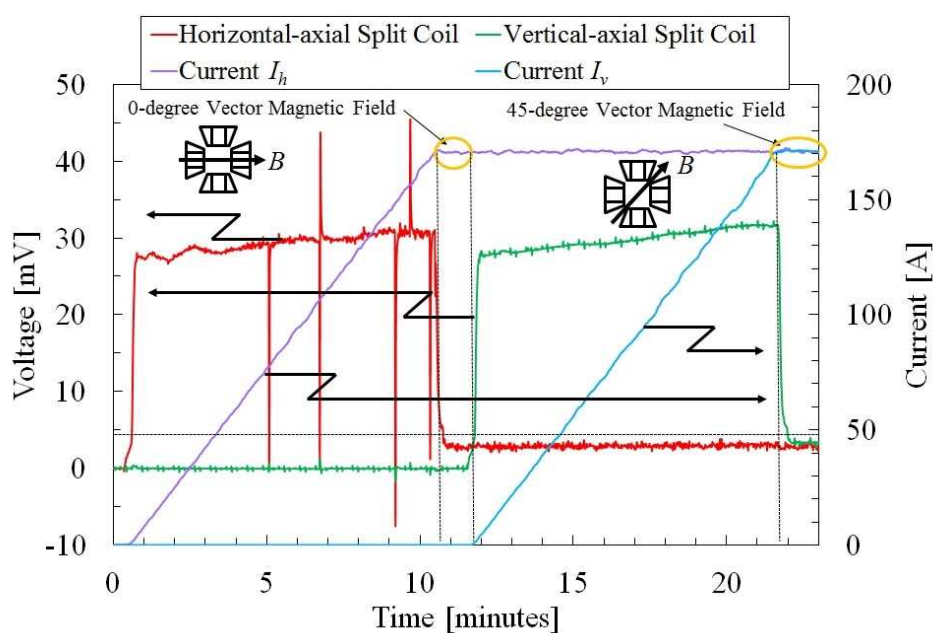


Fig. 3.35 Voltage across the vertical and horizontal-axial split coils in applying 170 A to both split coils.

3.11 結言

装置を回転させることなく、磁場方向だけを自在に変えることが出来る磁場方向可変酸化物超電導マグネット装置として、XMCD 計測用超高真空 3 軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置を開発した。磁場発生用コイルは、YBCO 酸化物超電導テープ線材を用いてテーパー状としたコイルユニット 4 個で構成された二軸スプリットコイル構造とした。

完成した装置の運転試験の結果、試料空間中心で 1.2 T 以上の 2 次元方向可変磁場を発生可能であることが立証された。また、本装置を使用した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の XMCD スペクトルの磁場角度依存性計測の結果から、本装置が新規 XMCD 計測に有用であることが確認された。

装置完成後、運転中に急激な電圧上昇が発生した。装置を分解した結果、コイルユニット 3 が焼損していることが分かった。コイルユニット 3 の補修を行い、再組立・通電試験を行なった結果、故障前と同様に運転できることを確認した。

現在、高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設フォトンファクトリーにて、本装置を使用した様々な実験が行なわれている。

第 3 章 参考文献

- 1) J. Chakhalian, et al.: “Magnetism at the interface between ferromagnetic and superconducting oxides,” *Nature Physics* **2** (2006) 244-248
- 2) K. Terai, et al.: “X-ray magnetic circular dichroism and photoemission studies of ferromagnetism in $\text{CaMn}_{1-x}\text{Ru}_x\text{O}_3$ thin films,” *Phys. Rev. B* **77** (2008) 115128
- 3) G. van der Laan, R. V. Chopdekar, Y. Suzuki and E. Arenholz: “Strain-induced changes in the electronic structure of MnCr_2O_4 thin films probed by X-ray magnetic circular dichroism,” *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 067405
- 4) H. Maruyama, M. Suzuki, M. Ito, N. Kawamura and K. Namikawa: “X-ray magnetic scattering and absorption experiments (BL39XU),” *Journal of the Crystallographic Society of Japan* **42** (2000) 76-86
圓山 裕，鈴木基寛，伊藤正久，河村直己，並河一道：「X線磁気散乱・吸収実験ステーション (BL39XU)」，日本結晶学会誌 **42** (2000) 76-86
- 5) E. Arenholz and S. O. Prestemon: “Design and performance of an eight-pole resistive magnet for soft X-ray magnetic dichroism measurements,” *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 083908
- 6) C.S. Hwang, C.T. Chen, C.H. Chang, C.Y. Liu, F.Y. Lin, B. Wang and R. Wahrer: “A novel superconducting octupole magnet for photon scattering experiments,” *J. Magn. Magn. Mater.* **239** (2002) 586-590
- 7) Y. Lee, H. Yamasaki and M. Furuse: “Magnetic-field angle dependent critical current densities and flux pinning in commercial YBCO tapes below liquid nitrogen temperatures,” *Physica C: Supercond.* **471** (2011) 1017-1020

- 8) 古瀬充穂, 岡野眞, 淵野修一郎, 藤森淳, 門野利治, 藤平潤一, 藤平誠一, 内田公, 藤平秀幸:「磁場発生装置および磁気分光測定装置」, 特願 2012-41922, 出願日 2012.2.28
- 9) T. Takematsu, R. Hu, T. Takao, Y. Yanagisawa, H. Nakagome, D. Uglietti, T. Kiyoshi, M. Takahashi and H. Maeda: “Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation,” *Physica C: Supercond.* **470** (2010) 674-677
- 10) G. Shibata, et al.: “Angle-dependent XMCD of ferromagnetic $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films using a vector-type superconducting magnet,” *The Physical Society of Japan 2012 Fall Meetings* (2012) **18aHC-4**
芝田吾郎ら:「ベクトル型超伝導マグネットを用いた強磁性薄膜 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の角度依存 XMCD」, 2012 年日本物理学会秋季大会 (2012) **18aHC-4**

第 4 章

MEG 用分離供給型 液体ヘリウム再凝縮装置の開発

4.1 緒言

脳磁計（Magnetoencephalograph : MEG）とは、脳で発生した非常に微小な磁場を複数の磁気センサで計測して、それから活動部位の電流を推定する装置である¹⁾。磁気センサには、超高感度磁気センサである超電導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device : SQUID）が用いられている。Fig. 4.1 に MEG の模式図を示す。MEG は医療機器として、てんかん、中枢神経疾患に伴う感覚障

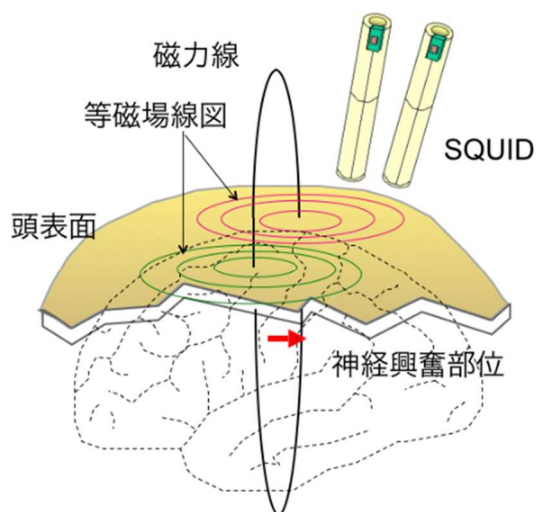


Fig. 4.1 Schematic diagram of MEG.

害及び運動障害の鑑別診断や脳外科手術部位の診断及び治療方針決定目的での検査に使用されている。最近では、認知症診断や脳の虚血部位の同定への利用の可能性が議論されている^{2,3)}。医療分野以外にも、言語や視覚、聴覚等の脳機能解明の研究にも利用されている。

MEG に使用される SQUID は、2 個のジョセフソン接合を含む超電導ループである。このループの中に磁束が侵入すると、それに対して周期的な超電導電流が流れ、それに応じた周期的な電圧が発生する。磁束検出感度 $10^{-14} \text{ T}/(\text{Hz})^{1/2}$ で、ごく微小な磁場を高感度に計測することが可能である。脳磁場は地磁気の 10 億分の 1 程度であるため、地磁気の影響を軽減するために、MEG は高透磁率を有するパーマロイで覆われた MSR 内に設置される。MEG 用 SQUID はニオブウム (Nb) で作成されており、超電導状態で動作させるために、液体ヘリウムが充填された GFRP 製デュワー内で冷却される。MEG を運用するには、SQUID を常に超電導状態にしておく必要があるため、液体ヘリウムを定期的に補充している。MEG の液体ヘリウム蒸発量は約 10 L/d⁴⁾ であり、補充時の蒸発分も含めると、1 年間の運用で 5200 L 以上の液体ヘリウムを消費するため、それに係る費用は大きなものとなる。

ヘリウムは、身近なところでは風船や飛行船から、半導体製造、光ファイバー製造、分析、リーク検出などの様々な分野で使用されている。そして、絶対零度に近い極低温機器を運用するためにも、ヘリウムは必要不可欠である。医療機器として一般化されている MRI や 2027 年を目処に実用化を目指している超電導リニアも、装置内部の超電導マグネットを冷却するために液体ヘリウムが使用されている。

しかし、国内で使用されるヘリウムは、全て海外からの輸入に依存している。そのため、輸出国内のストライキやパイプラインの不具合、プラントの定期修理などで、日本への供給が不足・停止する事態が幾度となく発生してきた⁵⁾。そして近年、**Fig. 4.2**⁶⁾に示したように、ヘリウム需要の拡大とプラントの定期修理の遅れに伴う日本への輸出制限によって、今までにない液体ヘリウム需給の逼迫とそれに伴う 3 倍以上の価格の高騰が発生しており、非常に深刻な状況となっている。今後、供給が回復しても価格が下がることは期待できないとも言われている。輸入に依存している限り、このような事態が今後も

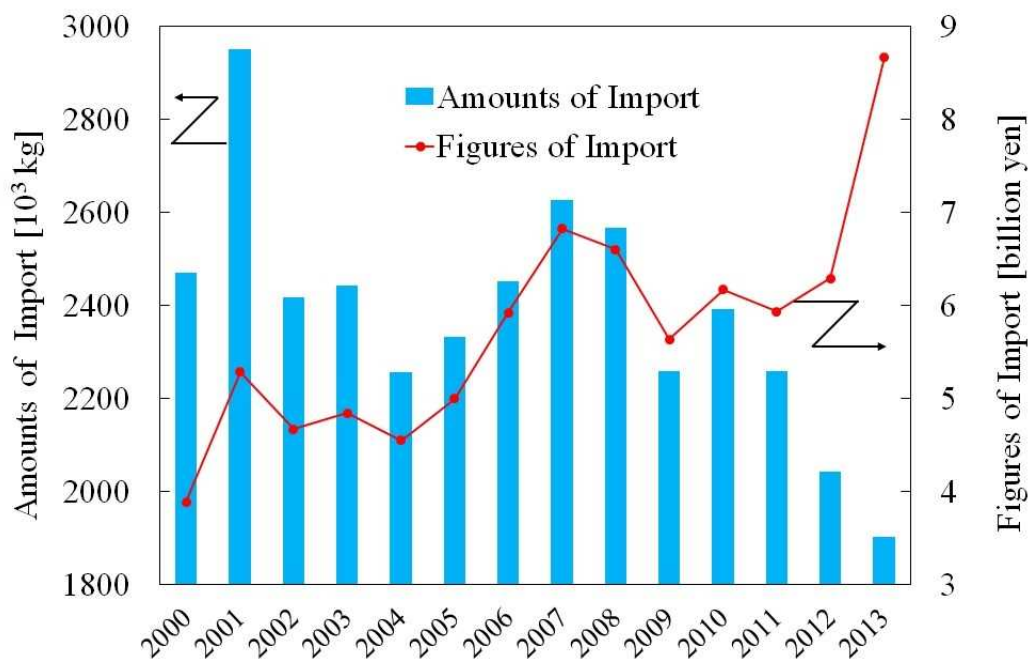


Fig. 4.2 Chronological amounts and figures of Import of helium (2010-2014).

起こるであろうことは容易に予測できるものである。また、ヘリウムは天然ガス産出時に取り出される副産物で、非常に軽い原子のために地上から宇宙へと放出されてしまう有限の資源である。そして、近年のヘリウム需要の増加から、将来的には枯渇してしまうと言われている。こういった状況から、ヘリウムを使用する側として、ヘリウムの消費量をどのように抑えていくかが急務となっている。

ヘリウムを全て輸入に依存している日本では、蒸発したヘリウムを回収して液化するリサイクル設備の運用が今までも行なわれてきた。しかし、このような設備は大型でコストがかかるため、液体ヘリウムを使用する全ての環境に導入されている訳ではなかった。そのため、液体ヘリウム液化設備がない環境では、外部から液体ヘリウムを購入して、蒸発したヘリウムは大気中に放出せざるを得なかった。しかし、上記で述べたようにヘリウム需給が逼迫した状況であるため、そのような環境でも液体ヘリウムの安定供給の実現のために、リサイクルすることが必要となってきた。

そういった状況の中、MEGの液体ヘリウム消費量を軽減する様々な取り組みがなされている。まず挙げられるのが、MEGのデュワー

に冷凍機を搭載して、閉じられたデュワー内で蒸発したヘリウムを再凝縮する方法である。この際、冷凍機の 1st ステージを用いて輻射シールドの冷却も行う。これは、MRI や NMR 等でも採用されている方式である。しかし、SQUID の近くに冷凍機を配置することになるので、冷凍機内の磁性材料や振動によるノイズの影響がとても大きい。そのため、冷凍機として低振動のパルス管冷凍機を用いることや、SQUID と冷凍機の位置関係の最適化、冷凍機の振動抑制、冷凍機用電磁気シールド等の検討が必要であり、実用化のための課題が多い。

そして、最も開発が期待されているのは、大規模なヘリウム液化設備を持たない小規模環境でも、蒸発したヘリウムガスを回収・再凝縮して MEG に供給することが出来る小型液体ヘリウム再凝縮装置である。以前までは、性能や装置運用、販売価格の面で、液体ヘリウムを購入するよりも有利であるとは言い難かった。しかし、近年のヘリウム需給の逼迫した状況と将来的に枯渇する可能性を考えると、再凝縮装置を導入する利点が大きくなっている。

そのひとつに、MEG と装置を直結させて完全閉サイクルとした直接供給方式の液体ヘリウム再凝縮装置⁶⁻⁸⁾があるが、MEG と装置が直結されているため、ノイズの増加が懸念される。また、従来の再凝縮装置のノイズ評価方法では、その評価が不十分であったり、実際の MEG 計測に関連する被験者の聴性誘発磁場への影響も調べられていなかった。

そこで、今回、ヘリウムコンテナを介した分離供給方式の液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なった。分離供給方式の利点は MEG とノイズ源となる装置が分離されていることであり、回収配管の接続を変更することで、MEG 以外の機器を含む複数の機器からヘリウムを回収することができるという柔軟性がある。そして、単体再凝縮能力計測が可能なカロリメーターを製作して、それを用いて本装置の再凝縮能力評価を行なった。なお、本装置は、閉塞の問題が少ないと考えられるガスバック無しの方式を採用した。また、再凝縮能力を確保するために 2 台の 2 段式 GM 冷凍機を搭載する構造とした。

装置のノイズ評価について、従来行われていたノイズスペクトラムの評価に加えて、新たな評価方法として、MEG ファントムによる位置ずれの計測と聴性誘発脳磁計測を提案し、実際にこれを行なった。

4.2 再凝縮サイクル設計

本装置の再凝縮サイクル設計の模式図とフローチャートを **Fig. 4.3** 及び **Fig. 4.4** に示す。また、サイクル設計に用いる式は、以下の式で与えられる。

$$F = \frac{Q_c}{H_a - H_b} \quad (4.1)$$

ここで、 F は質量流量、 Q_c は冷凍機の冷却能力、 H_a は冷却前のヘリウムの比エンタルピー、 H_b は冷却後の比エンタルピーである。また、本設計で用いた比エンタルピーの表を **Tabel. 4.1** に示す。

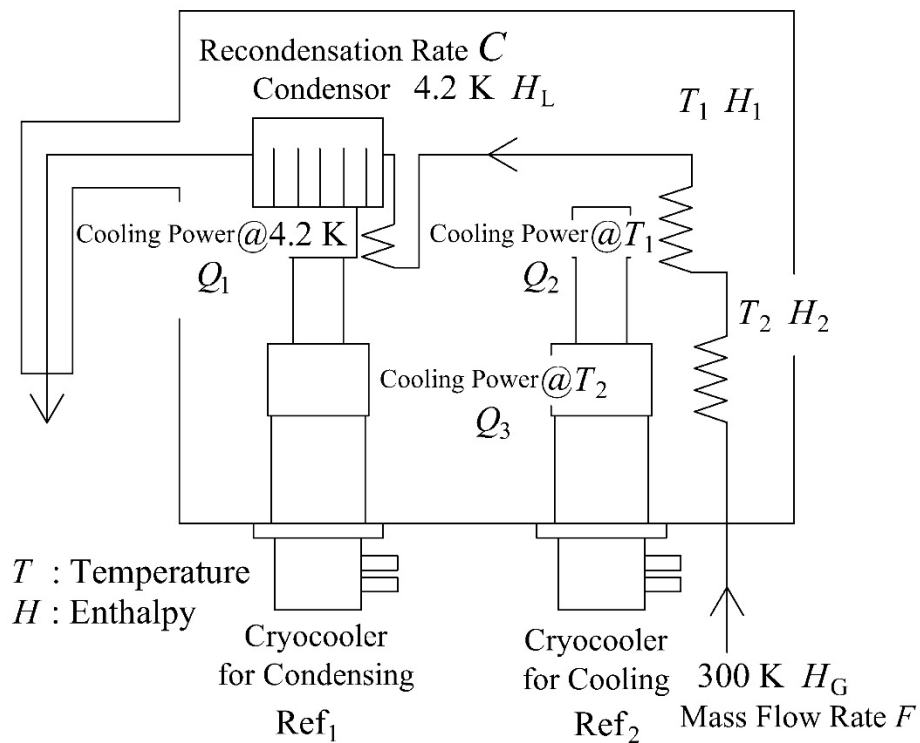


Fig. 4.3 The design of the liquid helium recondensing system with a separating LHe supply.

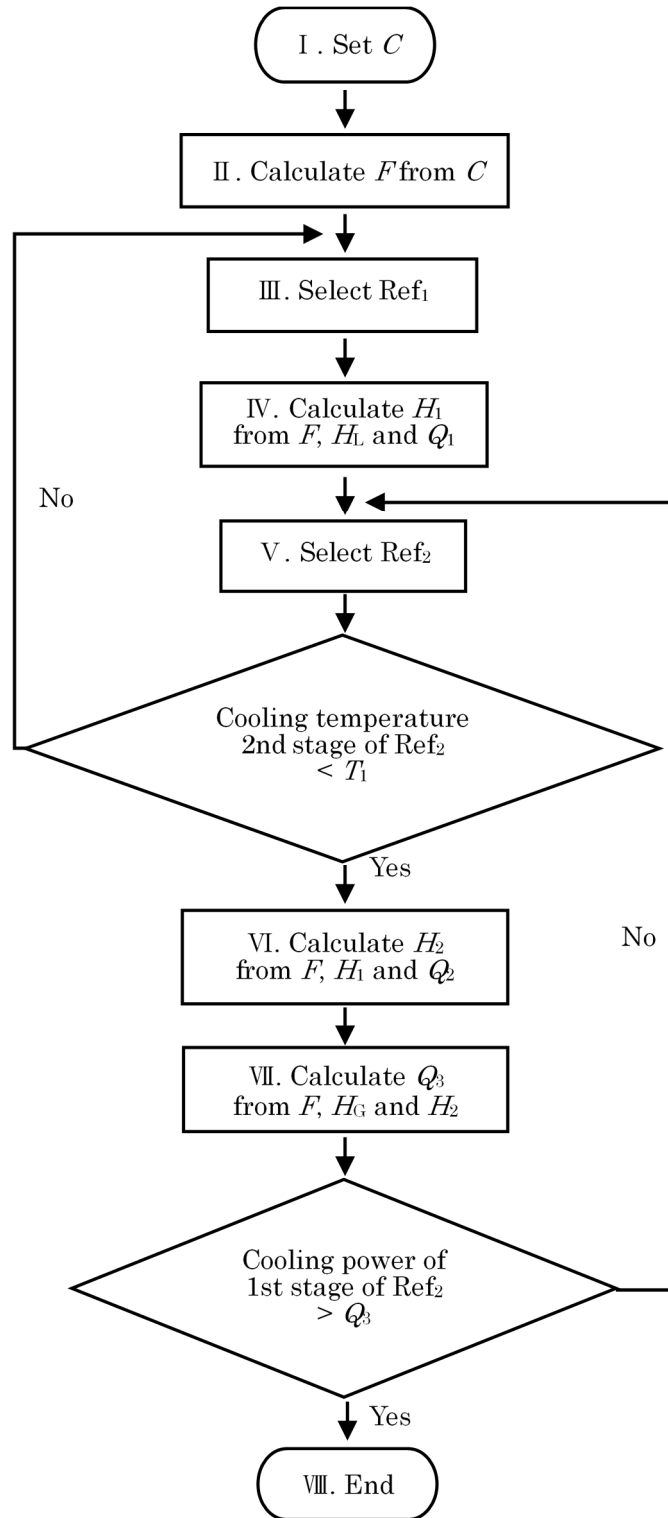


Fig. 4.4 Flowchart of the design of the liquid helium recondensing system.

Table. 4.1 Enthalpy used in the design of the liquid helium recondensing system with a separating LHe supply

Temperature [K]	Enthalpy [kJ/kg]	Pressure [MPa]
300	1574.5	0.1
100	524.8	0.1
90	472.86	0.1
80	430.5	0.1
70	378.5	0.1
60	326.5	0.1
50	274.5	0.1
40	222.5	0.1
35	196.5	0.1
30	170.5	0.1
25	144.5	0.1
20	118.5	0.1
15	92.1	0.1
10	65.5	0.1
6	43	0.1
4.2 (Gas)	30.6	0.1
4.2 (Liquid)	11.07	0.1

サイクルの設計手順として、(Ⅰ) 始めに最終的な再凝縮率を決定して、トランスファーチューブでの損失分を考慮した再凝縮器での再凝縮率 C を決定する。(Ⅱ) C から質量流量 F を算出する。(Ⅲ) 冷凍機 Ref_1 を仮に選定する。(Ⅳ)(4.1)式を用いてこの冷凍機の冷却前ヘリウムの比エンタルピー H_a を求め、この値を H_1 として、この時の温度を T_1 とする。この計算には、比エンタルピー H_b として 4.2 K の液体ヘリウムの比エンタルピー H_L を、 Q_c としては仮選択した Ref_1 の再凝縮ステージの 4.2 K での冷却能力 Q_1 をそれぞれ用いる。(Ⅴ) T_1 まで冷却可能な冷凍機 Ref_2 があるかどうか判断する。無い場合は、 Ref_1 の再選定をして H_1 の再計算を行う。 T_1 まで冷却可能な冷凍機 Ref_2 が見つかるまでこの手続きを繰り返す。(Ⅵ) Ref_2 を選定後、(1)式を用いて Ref_2 2nd ステージ流入時の比エンタルピー H_2 を算出し、

この時の温度を T_2 とする。ここでは、 H_b を H_1 として、 Q_c を Ref₂ 2nd ステージの T_1 での冷却能力 Q_2 とする。(Ⅶ) (4.1)式を用いて Ref₂ 1st ステージの T_2 での冷却能力 Q_3 を算出する。ここでは H_a を 300 K の比エンタルピー H_G として、 H_b を H_2 とする。(Ⅷ) Q_3 が選定した Ref₂ の冷却能力をオーバーする場合は、冷却能力を満たす Ref₂ を再選定して H_2 及び Q_3 の再計算を行い、再凝縮サイクルを成立させる。

今回の試作においては、装置単体での再凝縮率 10 L/d を実現すべく、トランスファーチューブでの損失分（計算では 2 L/d）を加味して、再凝縮器での再凝縮率 C を 12 L/d として設計を行なった。この再凝縮率での質量流量 F は 0.017 g/s である。この質量流量から、上記の設計手順で各計算及び冷凍機の選定を行なった結果を **Table. 4.2** に示す。

Table. 4.2 Calculation and cryocooler-selection results in the design of the liquid helium recondensing system with a separating LHe supply

C	12 L/d
F	0.017 g/s
H_L	11.07 kJ/kg
H_G	1574.5 kJ/kg
↓	
Select Ref.1 → 4 K-1.5 W GM Cryocooler	
Q_1	1.4 W
↓	
H_1	92.1 kJ/kg
T_1	15 K
↓	
Select Ref.2 → 20 K-8 W GM Cryocooler	
Q_2	2.3 W
↓	
H_2	222.5 kJ/kg
T_2	40 K
↓	
Q_3	23.5 W

Q_1 は、安全率を考慮して、Ref.1 2nd ステージの 4.2 K における冷却能力より 0.1 W 少ない値とした。

表に示したように、Ref₁ には 2 段式 4 K-1.5 W GM 冷凍機を、Ref₂ には 2 段式 20 K-8 W GM 冷凍機を選定した。そして、300 K のヘリウムガスは、Ref₂ によって 300 K→40 K→15K の順に冷却されて、Ref₁ 2nd ステージで 4.2 K に冷却、再凝縮器に導入されて再凝縮される設計とした。

4.3 熱交換器設計

回収されたヘリウムガスは、**Fig. 4.3** に示したように、予冷用冷凍機 Ref₂ の 1st ステージ、2nd ステージ及び再凝縮用冷凍機 Ref₁ の 2nd ステージに設けられた 3 個の熱交換器で段階的に冷却される。冷凍機の冷却能力を効率良く利用してそれを行なうために、十分な熱交換表面積を有する熱交換器が必要となる。そこで、各熱交換器の必要熱交換表面積の計算を行なった。以下に計算手順と計算結果を示す。

Fig. 4.5 に示したように一方が流体（ヘリウム）で、もう一方が温度一定の冷却部（冷却ステージ）である一方向流熱交換器の熱交換効率 Φ は以下の式で与えられる¹⁰⁾。

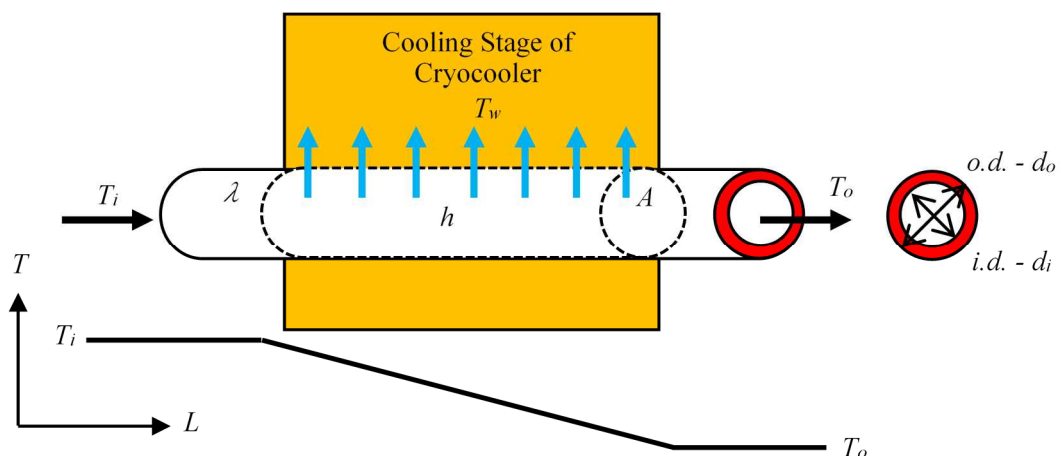


Fig. 4.5 View showing a frame format a heat exchanger with unidirectional flow.

$$\Phi = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_w} \quad (4.2)$$

$$\Phi = 1 - \exp(-Ntu) \quad (4.3)$$

ここで、 T_i は流体の入口温度、 T_o は流体の出口温度、 T_w は冷却部温度である。そして、 Ntu は number of unit と呼ばれる量で、以下の式で与えられる。

$$Ntu = \frac{KA}{c\dot{m}} \quad (4.4)$$

ここで、 K は熱通過率、 A は熱交換表面積（ここでは円管内面積）、 c は比熱、 $\dot{m}$ は質量流量である。これらの式を用いた一方向流熱交換器の設計手順は、以下の通りである。

- (1) 各温度を設定する。
- (2) (4.2)式より、必要な Φ を求める。
- (3) (4.3)式より、対応する Ntu を求める。
- (4) 系の熱伝達率 h を求める。
- (5) K を求める。
- (6) (4.4)式より A を求める。

手順(4)の h を求めるために必要な式は、一方向流熱交換器の流体が円管内を強制的に対流する場合、以下で与えられる。

$$Re = \frac{\rho v d_i}{\mu} \quad (4.5)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (4.6)$$

$$Nu = \frac{h d_i}{k} \quad (4.7)$$

ここで、 Re はレイノルズ数、 ρ は流体密度、 v は流体の流速、 d_i は円管の内直径、 μ は流体の動粘性係数、 Pr はプラントル数、 c_p は流体の定圧比熱、 k は流体の熱伝導率、 Nu はヌセルト数である。 Re は、慣性力と粘性力の比で定義された流れの状態を特徴づける無次元数であり、層流から乱流への遷移を示す指標として用いられる。一般的に $Re > 2000 \sim 3000$ で乱流となる。本稿では、層流から乱流へ遷移する Re を 2000 とした。そして、 Nu は流れの状態に応じて、以下の式で与えられる。

$$Nu \begin{cases} \doteq 4 & (\text{層流}) \\ = 0.023Re^{0.8}Pr^n & (\text{乱流}) \end{cases} \quad (4.8)$$

乱流での Nu を表す式は、Dittus-Boelter の式と呼ばれる。この式での Pr の指数 n は、流体を加熱する場合には 0.4 となり、冷却する場合は 0.3 となる。本項での熱交換器は、冷却を前提にしたものなので、 $n = 0.3$ とした。

(4.5)式～(4.8)式を用いて、熱伝達率 h を求める手順 (4) の詳細は以下の通りとなる。

- (i) d_i を設定する。
- (ii) d_i と $\dot{m}$ より、 v を求める。
- (iii) (4.5)式より、 Re を求める。
- (iv) 求めた Re より、層流もしくは乱流を決定する。
- (v) Nu を求める。(必要な場合、先に Pr を求める。)
- (vi) (4.7)式より h を求める。

手順 (5) の K を求めるために必要な式は、一方向流の熱交換器で流体の流路が円管の場合、以下の式で与えられる。

$$\frac{1}{d_i K} = \frac{1}{d_i h} + \frac{1}{2k_p} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \quad (4.9)$$

ここで、 d_o は円管の外直径、 k_p は円管の熱伝導率である。右辺第 1 項は円管内の熱伝達、右辺第 2 項は円管径方向の熱伝導を示している。 d_o を設定して、それと手順 (4) で求めた h から (4.9) 式より K を求める。そして、求めた K と (4.4) 式より A を求める。なお、 c は流体が一定圧として定圧比熱を用いる。

以上の設計手順を用いて、本装置の熱交換器の設計を行なった。本装置に用いる熱交換器は、300 K→40 K 用第 1 熱交換器、40 K→15 K 用第 2 熱交換器、15 K→4.2 K 用第 3 熱交換器の三種類である。各熱交換器は、螺旋状に R 溝加工された無酸素銅ブロック（円柱または円筒）に燐脱酸銅製の流体流路用円管を巻きつけて半田接続する構造とした。無酸素銅ブロックの温度を冷凍機のステージと同じ温度とした。

各熱交換器設計における設定値及び物性値を **Table. 4.3** に示す。なお、各物性値は、計算の簡便化のために、中間温度の物性値を用いた。

Table. 4.3 Designed values and material properties used in design of heat exchangers

	1st Heat Exchanger 300 K-40 K	2nd Heat Exchanger 40 K-15 K	3rd Heat Exchanger 15 K-4.2 K
	Helium gas	Helium gas	Helium gas
T_i	300 K	40.001 K	15.1 K
T_o	40.001 K	15.1 K	4.31 K
T_w	40 K	15 K	4.2 K
Φ	99.9995%	99.62%	98.98%
Pressure	0.1 MPa		
d_i	6 mm	3 mm	3 mm
d_o	8 mm	4 mm	4 mm
$\dot{m}$	0.017 g/s		
ρ	0.28 kg/m ³	1.75 kg/m ³	5.16 kg/m ³
v	2.2 m/s	1.4 m/s	0.48 m/s
μ	13.9 $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	4.4 $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	2.2 $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$
c_p	5.2 J/gK	5.2 J/gK	5.4 J/gK
k	0.11 W/mK	0.032 W/mK	0.016 W/mK
k_p	400 W/mK	60 W/mK	20 W/mK

そして、**Table. 4.3** で示した値から求めた熱交換器設計の計算結果を **Table. 4.4** に示す。設計で得られた必要熱交換表面積から、流体流路用円管の長さを決定して各熱交換器の製作を行なった。

Table. 4.4 Calculated results of heat exchangers

	1st Heat Exchanger 300 K-40 K	2nd Heat Exchanger 40 K-15 K	3rd Heat Exchanger 15 K-4.2 K
<i>Ntu</i>	12.22	5.59	4.59
<i>Re</i>	264.3	1678.5	3347.9
Convection	Laminar flow	Laminar flow	Turbulent flow
<i>Pr</i>	0.685	0.714	0.728
<i>Nu</i>	4	4	13.38
<i>h</i>	70.53 W/m²K	42.56 W/m²K	73.38 W/m²K
<i>K</i>	70.52 W/m²K	42.55 W/m²K	73.26 W/m²K
	↓	↓	↓
<i>A</i>	0.0156 m²	0.0118 m²	0.0059 m²
	↓	↓	↓
Length of Cu pipe	830 mm	1257 mm	628 mm

4.4 再凝縮器設計

各熱交換器で 4.2 K 付近まで冷却されたヘリウムガスは、再凝縮器内に導入されて液体ヘリウムに再凝縮される。再凝縮器も、熱交換器と同様に、導入されるヘリウムガスを全て凝縮するために十分な凝縮表面積を有する必要がある。そこで、再凝縮器の必要凝縮表面積の計算を行なった。以下に計算手順と計算結果を示す。ただし、計算における圧力は、大気圧（= 0.1 MPa）とした。

まず、必要凝縮表面積 A_{co} は、以下の式で与えられる。

$$A_{co} = \frac{Q_{co}}{h_{co} \Delta T} \quad (4.10)$$

ここで、 Q_{co} は凝縮熱量、 h_{co} は凝縮熱伝達率、 T は温度である。また、 Q_{co} は以下の式で与えられている。

$$Q_{co} = \dot{m} \lambda \quad (4.11)$$

ここで、 λ は液体ヘリウムの蒸発潜熱（= 20.4 kJ/kg @0.1 MPa）である。本装置における $\dot{m}$ は 0.017 g/s なので、(4.11)式より、 Q_{co} は以下の通りとなる。

$$Q_{co} = 0.017 * 20.4 \cong 0.35 \text{ W} \quad (4.12)$$

そして、4.2 K 付近のヘリウムガスが液体ヘリウムに凝縮する時の h_{co} は、約 650 W/m²K になることが知られている¹¹⁾。よって、ヘリウムガスが 0.1 K 冷却されて凝縮とした場合、(4.10)式より、 A_{co} は以下の通りとなる。

$$A_{co} = \frac{0.35}{650 \times 0.1} \div 0.0054 \text{ m}^2 = 5400 \text{ m m}^2 \quad (4.13)$$

以上より、本装置の再凝縮器に必要な凝縮表面積は 5400 mm^2 であることが分かった。安全率を約 5.5 倍として、再凝縮器の凝縮表面積を 30000 mm^2 以上とした。**Fig. 4.6** に再凝縮器の模式図を示す。再凝縮器は内径 46 mm、深さ 50 mm の円筒状として、内部に縦 40 mm、横 30 mm、幅 2 mm のフィン 8 枚を設けた。この表面積は 31029.5 mm^2 である。

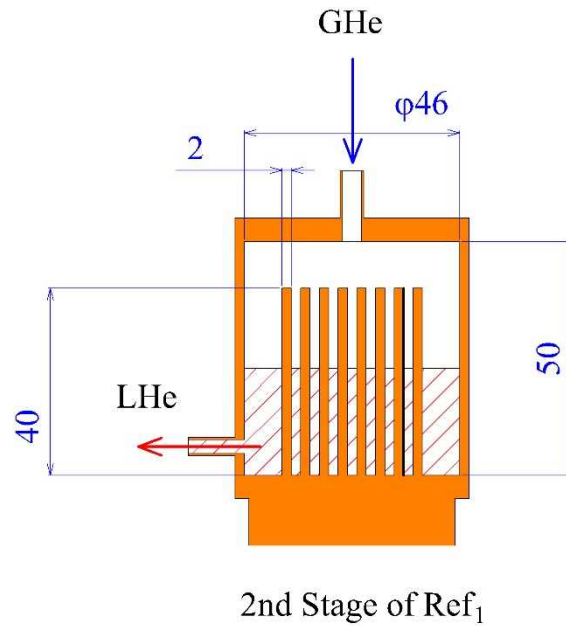


Fig. 4.6 View showing a frame format of the condensor.

4.5 装置の構造

前項までに、再凝縮サイクルの計算と冷凍機の選定、各熱交換器及び再凝縮器の設計を行い、それによって再凝縮機の製作を行なった。また、本装置に必要な機器として、ヘリウムガス移送用コンプレッサー1台と乾燥器2台を用いた。前者はヘリウムリークタイト仕様であり、後者は内部にモレキュラーシーブが内蔵されている。それらを用いて完成させた本装置の系統図を **Fig. 4.7** に示す。

以下に再凝縮サイクルの詳細を述べる。MEGで蒸発したヘリウムガスは、MEGと電気絶縁された回収配管を通して、本装置内で乾燥、精製される。精製されたヘリウムガスは、冷凍機 Ref2 の1st ステージ及び2nd ステージで段階的に冷却されて、冷凍機 Ref1 の2nd ステージに設置された再凝縮器内で再凝縮される。そして、再凝縮された液体ヘリウムは、トランスファーチューブを介して液体ヘリウムコンテナに貯蔵される。本装置はガスバック無しなので、液体ヘリウム

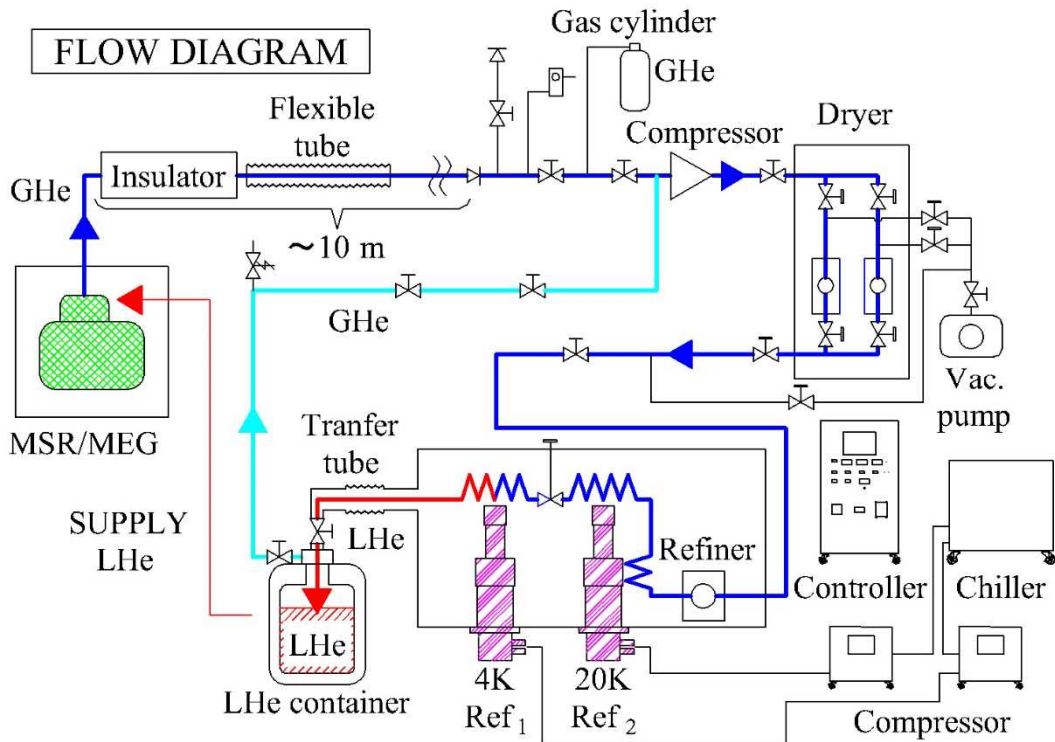


Fig. 4.7 Flow diagram of the developed system, which consists of a compressor, dryer, condenser and controller.

を MEG に移送する時に発生する蒸発ヘリウムガスのうち、本装置で再凝縮できない分は大気放出させる。乾燥器は、一方にヘリウムガスを通わせて乾燥を行い、もう一方はヒーターで加熱した状態で油回転ポンプにより内部を真空排気して水分を除去しておく。乾燥器の直後に露点計が設置されており、一方の乾燥器内に水分が限界以上に充満して露点が増加したら、もう一方と切り替える。また、再凝縮機直前に圧力計が設置されており、内部の精製器や配管に閉塞が発生した場合に圧力が上昇するので、一旦サイクルをストップさせて、内部ヒーターで再凝縮機内を加熱して、配管内を油回転ポンプで真空排気して閉塞解除を行うという仕組みである。

4.6 単体再凝縮能力試験

装置が設計通りの能力を有するかを確認するために、まず無負荷での単体再凝縮能力を評価することにした。従来の再凝縮された液体ヘリウムをデュワーに供給してその液面上昇から評価する方法では、デュワーへの熱侵入やデュワーの形状による誤差が生じ、また計測時間がかかるためである。

まず、無負荷に近い状態を実現するために、外部からの熱侵入を極力低減した小型容器を用意した。さらに再凝縮量を正確に計測するために、小型容器内に設置したヒーターから熱を印加して再凝縮量と蒸発量をバランスさせて定常状態を保つ仕組みを作った。蒸発量は定常状態のヒーター出力から正確に計算できるので、再凝縮量も正確に計測が可能である。この計測方法をカロリメーター方式と呼ぶことにする。

Fig. 4.8 にカロリメーターを使用した計測方法の模式図を示す。カロリメーター内に液体ヘリウムを連続的に供給した状態で、ヒーターによって熱を印加する。そして、内部圧力に対応した飽和温度で安定するヒーターの最大出力を求める。この安定した状態では、ヒーター最大出力とヘリウムの蒸発熱、つまりは再凝縮率がバランス

している。よって、このヒーター最大出力から再凝縮率を算定することが可能である。

カロリメーター方式で計測される再凝縮率 C' は、以下の式で与えられる。

$$C' = \frac{Q_h}{\lambda \rho_{he}} \quad (4.14)$$

ここで、 Q_h は定常状態のヒーター出力、 λ は液体ヘリウムの蒸発潜熱、 ρ_{he} は液体ヘリウムの密度である。上記の方式に基づいたカロリメーターの模式図を **Fig. 4.9** に示す。カロリメーターは再凝縮装置のトランスファーチューブ（液体ヘリウム出口）に設置されて、蒸発ヘリウムガス配管は再凝縮装置のガス回収ラインに接続される。カロリメーターは真空断熱構造となっており、真空断熱部には輻射シールドが施工されている。ヘリウム槽底面にはヒーターが設置されており、温度センサーはトランスファーチューブ先端より少し上に設置されている。また、内部圧力を計測するための圧力計も設置されている。カロリメーター室温部からの熱侵入は、蒸発したヘリウムガスにより冷却・除去されるため、無視できる。

上記の計測を行なった結果、内部圧力が 3 kPa、温度が 4.2 K に安定した時のヒーター最大出力は 0.285 W であった。液体ヘリウムの蒸発潜熱は 20.4 kJ/kg、密度は 125 kg/m³ なので、(4.14)式より装置単

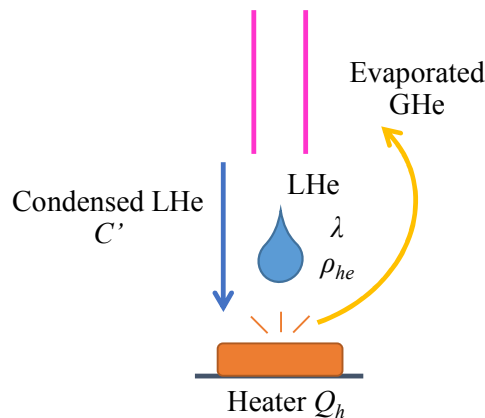


Fig. 4.8 View showing a frame format of the performance test using the calorimeter.

体の再凝縮率が 9.6 L/d であることを確認した。本装置の再凝縮率の設計値は 10 L/d なので、ほぼ設計通りの性能があることが分かった。

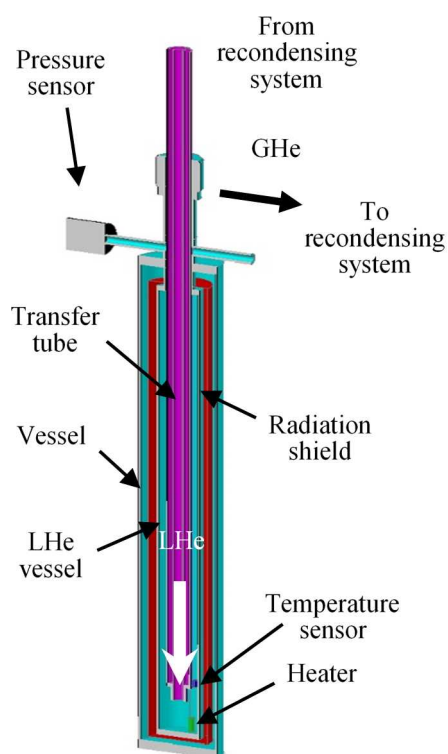


Fig. 4.9 View showing a frame format of the calorimeter, which consists of a vessel, heater, temperature sensor and pressure sensor.

4.7 再凝縮運転

本装置を 100 L ヘリウムコンテナに接続して、負荷ありでの再凝縮運転を行い、再凝縮率計測を行なった。計測結果を **Fig. 4.10** に示す。コンテナ内に液体ヘリウムが約 56 L 貯蔵されている状態で計測を行なった。結果として、再凝縮率が 7.9 L/dであることを確認した。単体再凝縮率 9.6 L/dであったので、損失分が 1.7 L/dであったが、これはコンテナへの熱侵入によるものと考えられる。この損失分については、より熱侵入が少ないコンテナに変更することで改善が可能と考える。

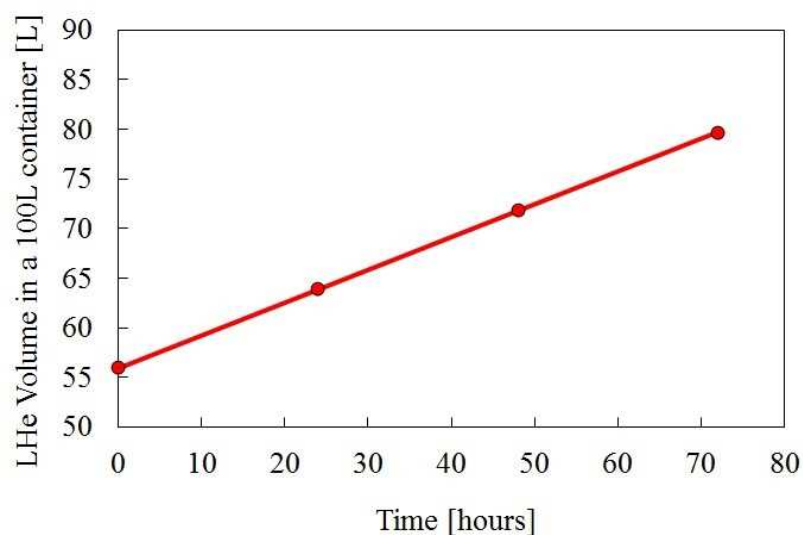
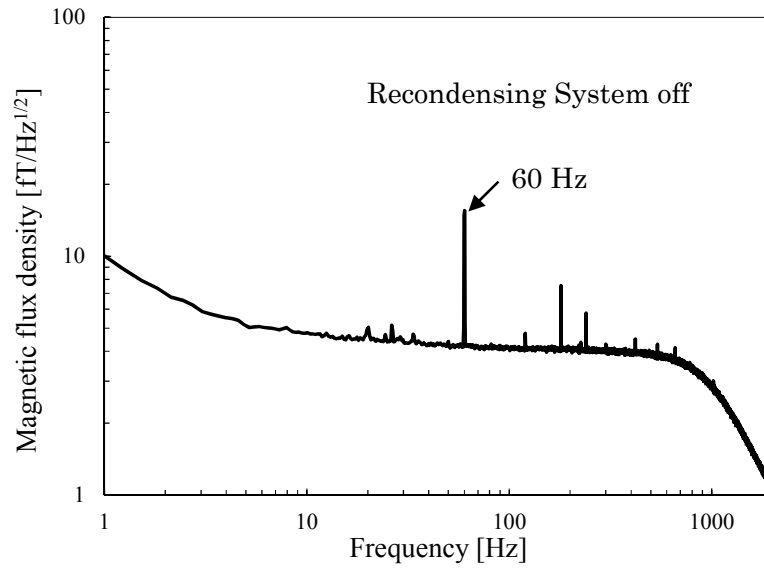


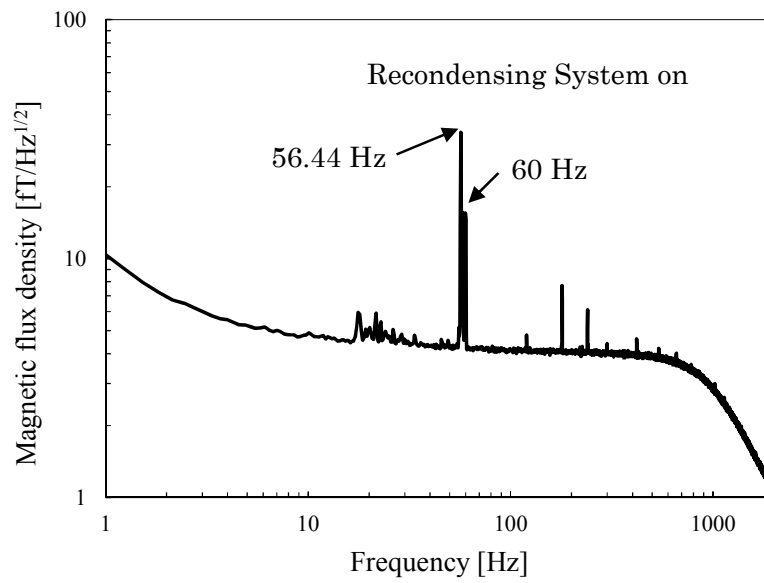
Fig. 4.10 Liquid helium recondensation using a 100 L LHe container.

4.8 磁気ノイズ計測

再凝縮装置のもう一つの重要な性能は、装置の発生するノイズがどの程度 MEG に影響を与えるかということである。そこで、本装置の評価として、再凝縮運転時及び停止時の MEG の磁気ノイズ計測を行なった。これは、従来行なわれてきた評価方法である。なお、本装置と MEG の間隔は約 10 m とした。計測結果を **Fig. 4.11** に示す。この図のノイズスペクトラムは 160 ch の SQUID センサの総平均であり、データ収録はサンプリング 5 kHz で 30 秒で行なった。ハイパスフィルタ (HPF) は 0.1 Hz で、ローパスフィルタ (LPF) は 1 kHz とした。計測に使用した MEG には、定常的に商用電源からの 60 Hz の磁気ノイズが発生している。結果として、運転中には 56.44 Hz の磁気ノイズが発生し、冷凍機の振動による影響が増加したが、白色領域の上昇は観測されなかった。従って、本装置が MEG に与える影響は極僅かなことが分かった。これは電氣的絶縁の容易さが奏功しているものと思われる。振動による影響については、計測に使用した磁気シールドルームの施工状態に依るものである。



(a)



(b)

Fig. 4.11 Magnetic noise spectra in the MEG with the recondensing system (a) off and (b) on. Noise at 60 Hz is from the power line.

4.9 校正された MEG ファントムによる位置ずれ計測

本装置が MEG のシステムノイズに与える影響は小さいことを 4.8 項で述べたが、実際の MEG 計測の場面でどのような影響があるかを確認するために、新たな評価方法として、MEG ファントムを用いて装置運転時及び停止時の MEG 計測における位置のずれを計測することにした。使用した MEG ファントムのモデル図及び写真を **Fig. 4.12** 及び **Fig. 4.13** に示す。この MEG ファントムは、人の脳をモデル化したものであり、50 個の等価電流双極子 (Equivalent Current Dipole : ECD) を持つ¹²⁾。また、このファントムは乾式型であり、ECD の位置は 0.15 mm 以下の不確かさで校正されたものである。

MEG ファントムの MEG への設置写真を **Fig. 4.14** に、MEG ファントムによる計測方法の模式図を **Fig. 4.15** に示す。周波数 11 Hz、振幅 $20\text{ }\mu\text{A}$ の正弦波電流 (2 波分) を MEG ファントムの各 ECD に印加し、それによって発生した磁場を MEG で計測して、ECD の位置を測定した。これを、実際の ECD の位置と比較して MEG 計測の位置ずれを求めた。

50 個の ECD についての位置ずれの計測結果を **Fig. 4.16** と **Table. 4.5** に示す。**Fig. 4.16** は位置ずれの度数分布であり、**Table. 4.5** は平均値と標準偏差である。

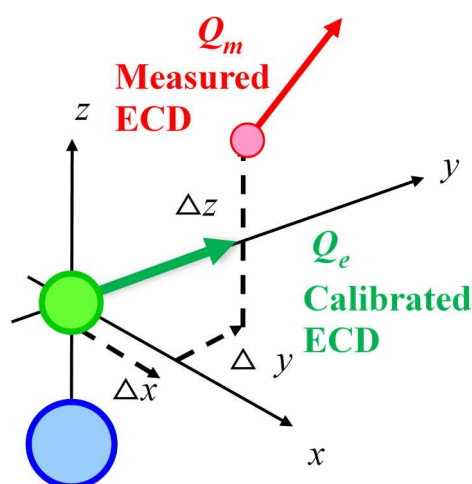


Fig. 4.12 View showing a frame format of the MEG phantom.

装置運転及び停止の違いによる ECD 座標ずれの平均値及び標準偏差の差は、いずれも 0.1 mm 以下であった。また、標準偏差については F 検定を行ったところ、有意水準 5% で運転と停止の間での有意差が無いことが分かった。従って、装置運転による MEG 計測の位置ずれは認められず、MEG 計測に与える影響も僅かなことが示された。



Fig. 4.13 Photograph of the MEG phantom, which has 50 equivalent current dipoles.

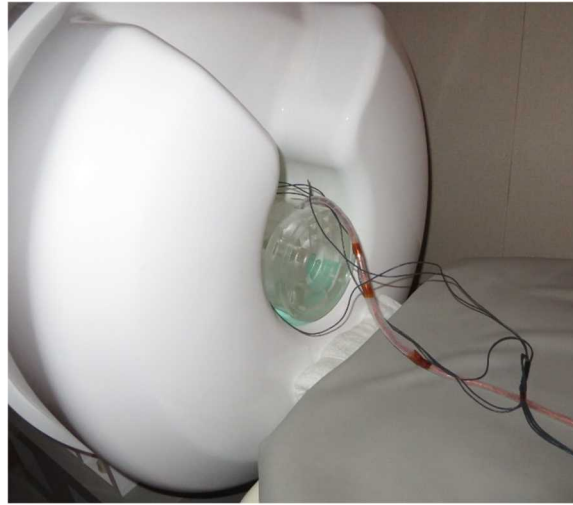


Fig. 4.14 Photograph of the MEG phantom installed in MEG.

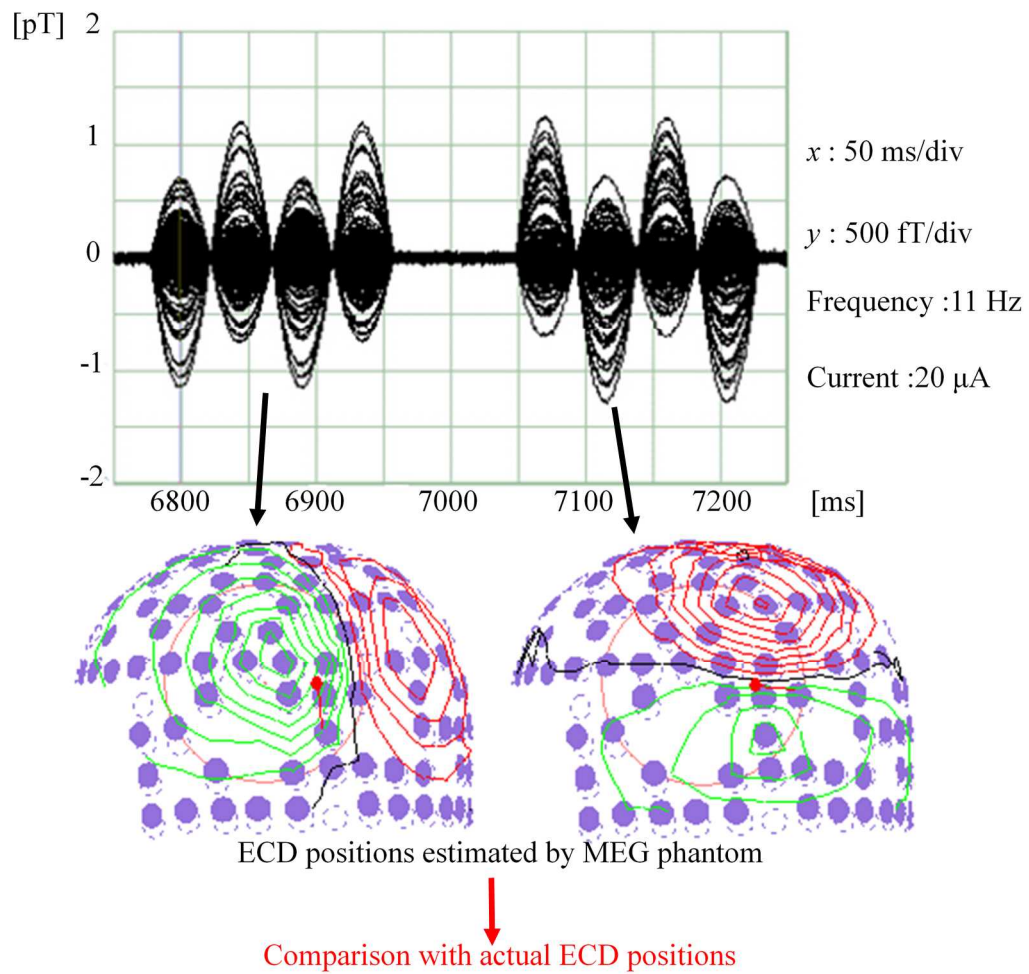
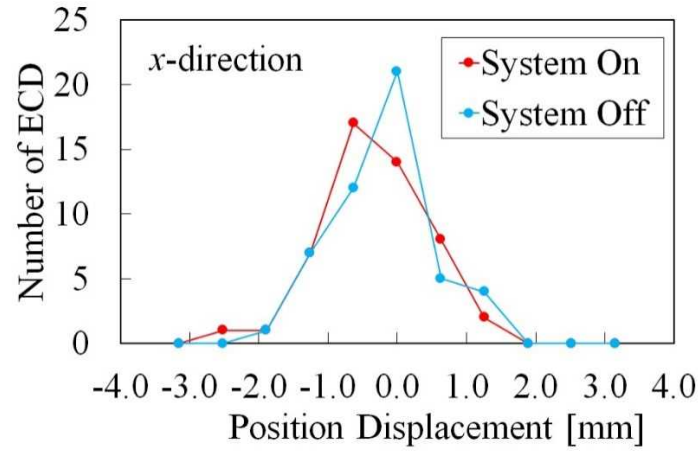
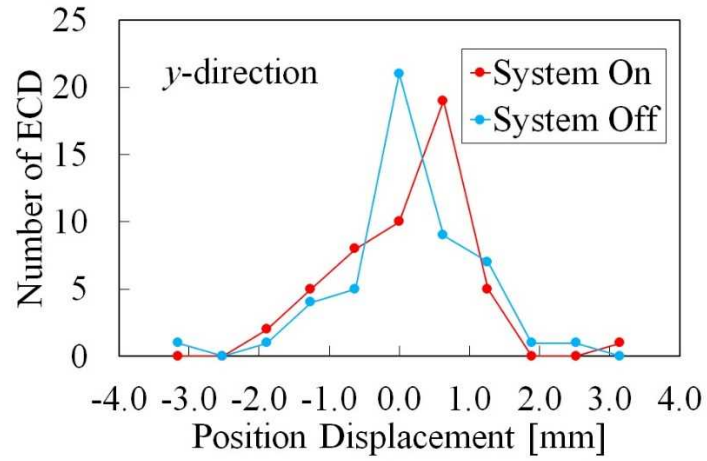


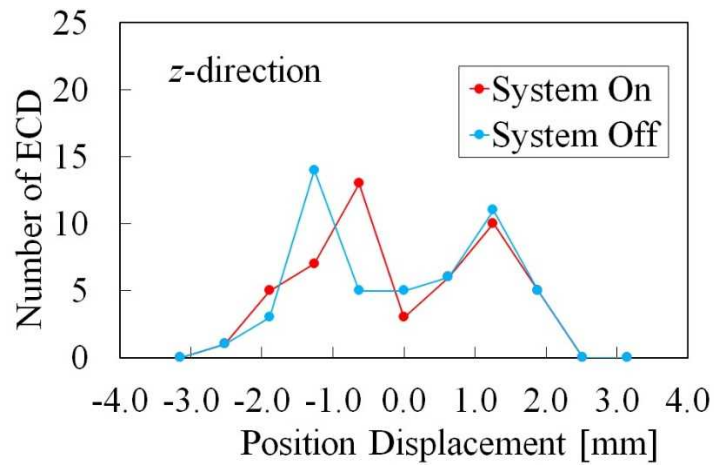
Fig. 4.15 Measurement of ECD position using MEG phantom.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.16 ECD position displacement of (a) x -direction, (b) y -direction and (c) z -direction measured by the MEG phantom.

Table. 4.5 Measuring results of the position gap using MEG phantom

		Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
Averaged Value	ON	-0.2	0.3	0.1
	OFF	-0.1	0.2	0.1
Standard Error	ON	0.1	0.1	0.2
	OFF	0.1	0.1	0.2

4.10 聴性誘発脳磁計測

被験者が装置の動作音を聞いて、それによる誘発磁場がどうかについては、過去に検討された報告はない。そこで、まず本装置運転時及び停止時の聴性誘発脳磁に差が出るかどうかについて計測を行なった。被験者は、聴覚正常な 31 歳男性である。音刺激は、50 ms 幅の 1 kHz のショートトーンバーストを左耳に呈示した。データは、サンプリング 1 kHz で 180 秒で収録し、収録後に呈示音をトリガーとして 100 回の加算平均の処理を行なった。この処理によって、被験者の呈示音に対する聴性誘発磁場が計測可能となる。HPF 及び LPF は、それぞれ 0.1 Hz 及び 200 Hz である。装置運転及び停止時のそれぞれの計測結果を 160 ch の重複表示図及びコンターマップとして **Fig. 4.17** 及び **Fig. 4.18** に示す。結果として、本装置 on/off によって呈示音に対する聴性誘発脳磁に差異がないことを確認した。

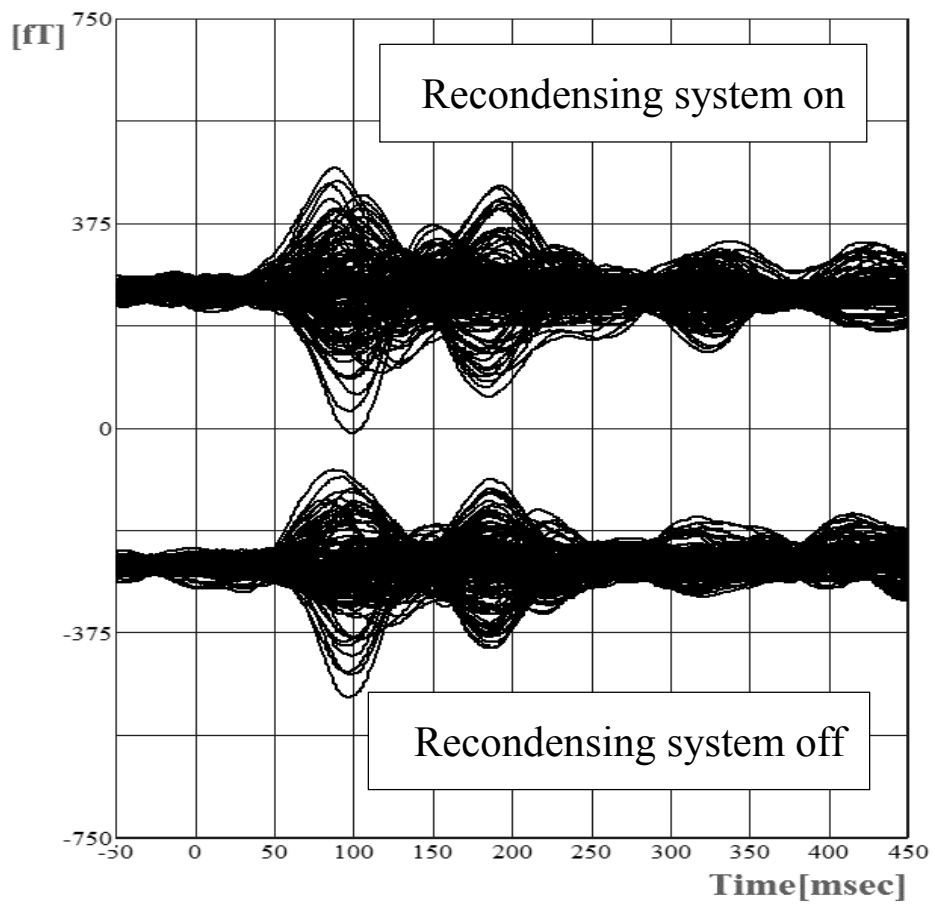
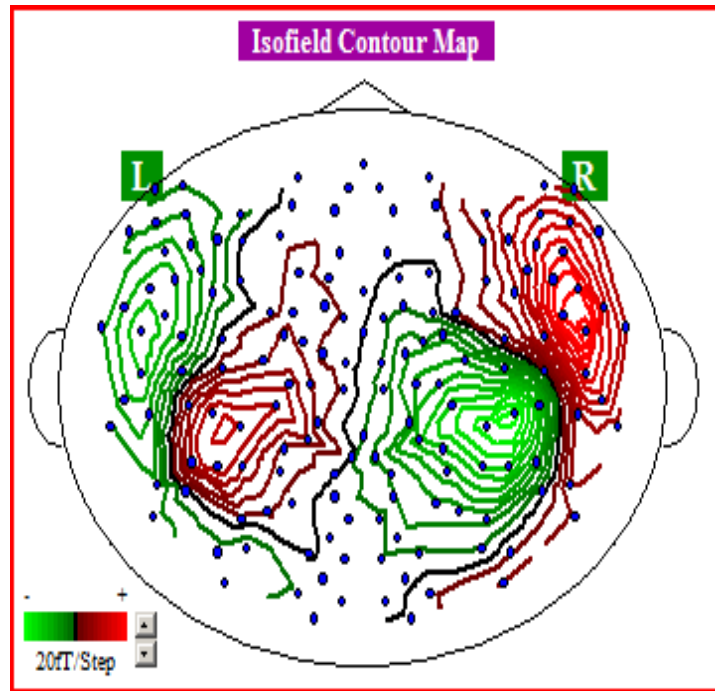
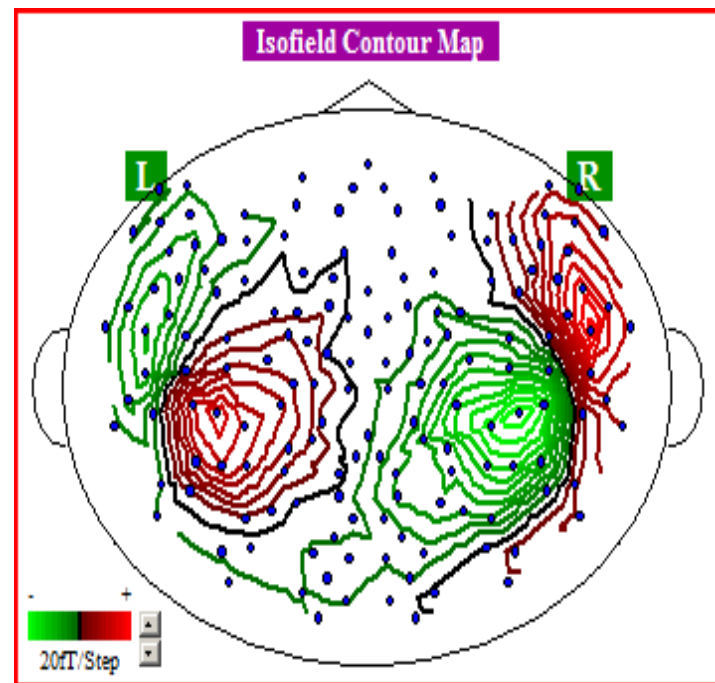


Fig. 4.17 AEF averaged with the acoustic stimulation trigger with the recondensing system on and off. The number of SQUID sensors is 160.



(a)



(b)

Fig. 4.18 Isofield contour maps of AEF with the recondensing system (a) on and (b) off.

次に、装置の運転時において 1 kHz の呈示音と冷凍機の動作音のそれぞれに対する被験者の反応を比較することにした。前者については上記で得られている。後者については冷凍機の動作音をトリガーとして 100 回の同期加算処理を行なった。これにより、被験者の冷凍機の動作音に対する聴性誘発磁場が計測可能となる。計測結果を **Fig. 4.19** に示す。被験者の冷凍機の動作音に反応する脳磁信号は見受けられなかった。従って、聴性誘発脳磁計測において、本装置の動作音による被験者の聴覚への影響は無視できるほど小さいことが示された。

なお、計測時の音環境は、本装置の冷凍機用圧縮機から 15 cm 地点で平均 75.4 dB、磁気シールドルーム外壁から 60 cm 地点で平均 48.6

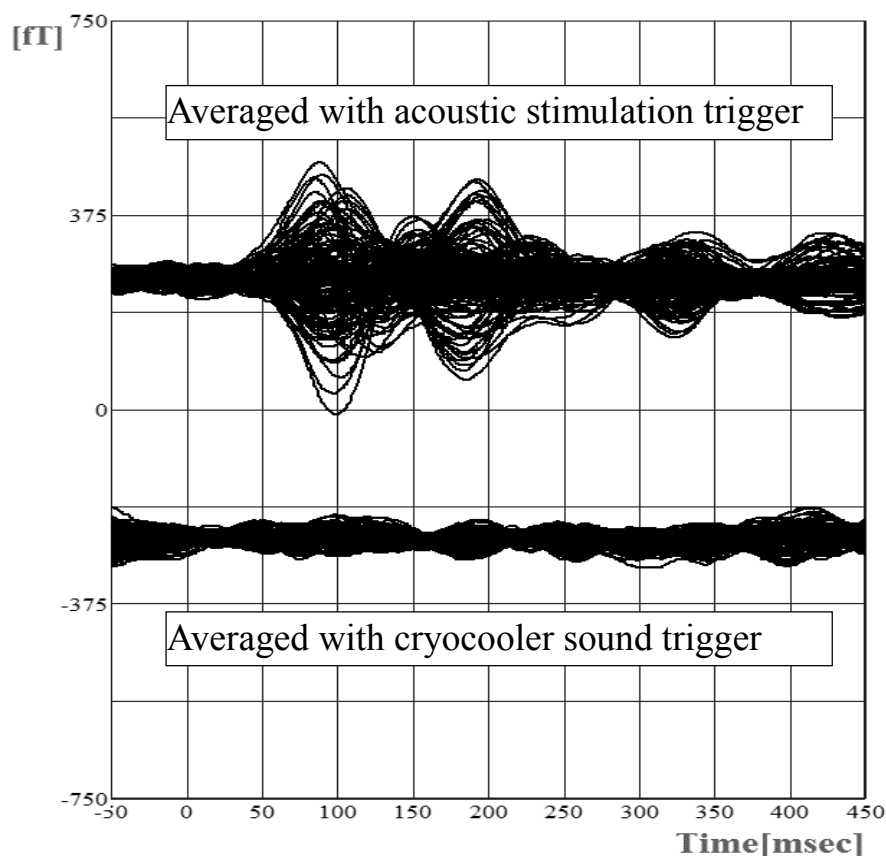


Fig. 4.19 AEF averaged with the cryocooler sound trigger (the lower trace), and AEF averaged with the acoustic stimulation trigger (the upper trace). The cryocooler was in operation in both cases. The number of SQUID sensors is 160.

dB、磁気シールドルーム内の MEG から 120 cm 地点で平均 26.3 dB の騒音レベルであった（RION 社製 NL-52 で計測）。また、装置停止時の磁気シールドルーム内の MEG から 120 cm 地点での騒音レベルは平均 22.6 dB であった。

4.11 結言

ヘリウム資源の問題を解決するために、MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なった。必要な再凝縮能力を設定して、再凝縮サイクル、熱交換器と再凝縮器の設計を行った。

単体再凝縮能力計測のためにカロリメーター方式を提案して本装置の能力試験を行ない、9.6 L/d とほぼ設計通りの再凝縮性能を有することを確認した。また、100 L ヘリウムコンテナに接続した時の再凝縮率として 7.9 L/d を得た。単体再凝縮能力との差はコンテナへの熱侵入によるものと考えられる。

従来の評価方法である磁気ノイズ計測に加えて、新規評価方法として MEG ファントムによる位置ずれ計測及び聴性誘発磁場計測を行なった。結果、本装置による MEG 計測への影響は見られず、正常に計測が可能なことが分かった。よって、本装置の分離供給方式が有用であることが分かった。

第 4 章 参考文献

- 1) G. Uehara and J. Kawai: “Magnetoencephalogram with SQUID sensor for medical application,” *Journal of IEEJ* **130** (2010) 146-149
上原 弦，河合 淳：「SQUID センサを用いた医療用脳磁界計測装置」，*電気学会誌* **130** (2010) 146-149
- 2) N. Hatsusaka, et al.: “Construction of a spontaneous MEG database to develop diagnostic protocols for dementia,” *JBBS Conference* **22** (2007) 206-207
初坂奈津子ら：「認知症診断のための自発性脳磁場データベースの構築」，第 **22** 回 2007 年度日本生体磁気学会論文集 **20** (2007) 206-207
- 3) S. Sakamoto, et al.: “Quantitative imaging of spontaneous neuromagnetic activity for assessing cerebral ischemia using sLORETA-qm,” *Neuroimage* **49** (2010) 488-497
- 4) J. Kawai: “Developments and challenges on SQUID-based biomagnetic measurement systems,” *TEION KOGAKU* **42** (2007) 303-310
河合 淳：「脳磁場計測システムの現状と課題」，*低温工学* **42** (2007) 303-310
- 5) H. Bando, Y. Tsuboi and K. Mori: “Helium : A Precious element diffusing into space : The history and future prospect of its demand and supply,” *TEION KOGAKU* **48** (2013) 68-76
坂東寛，坪井勇一，森一彦：「大気圏外に散逸する希少資源ヘリウム―需給の歴史と将来展望―」，*低温工学* **48** (2013) 68-76
- 6) 財務省貿易統計
- 7) T. Takeda, et al.: “An efficient helium circulation system with small gm cryocoolers,” *TEION KOGAKU* **43** (2008) 174-179
武田常広ら：「小型 GM 冷凍機による高効率ヘリウム循環装置」，*低温工学* **43** (2008) 174-179
- 8) T. Takeda, et al.: “Performance of a helium circulation system for a

MEG,” *Cryogenics* **49** (2009) 144-150

- 9) T. Takeda, et al.: “Performance results of a HCS installed on a commercialized MEG,” *JBBS Conference* **28** (2013) 264-265
武田常広ら：「HCS（ヘリウム循環装置）の運用実績」，第 **28** 回
2013 年度日本生体磁気学会論文集 26 (2013) 264-265
- 10) (社)日本機械学会 編：「機械工学便覧」，丸善株式会社，東京
(2006)
- 11) S. Sato and H. Ogata: “Film-condensation heat transfer of helium in a vertical tube,” *TEION KOGAKU* **10** (1975) 180-184
佐藤新太郎，尾形久直：「垂直管内におけるヘリウムの凝縮熱伝達」，*低温工学* **10** (1975) 180-184
- 12) G. Uehara: “Proposition and fabrication of a standard MEG phantom,”
JBBS Conference **28** (2013) 134-135
上原弦：「脳磁計の評価のための標準ファントムの提案と試作」，
第 **28** 回 2013 年度日本生体磁気学会論文集 26 (2013) 134-135

第 5 章

結論と今後の展望

5.1 結論

本研究では、現代社会におけるエネルギーとヘリウム資源の問題を解決すべく、極低温を大きな柱として、酸化物超電導を用いて小型化・省電力化された超電導機器の実用化を実証し、液体ヘリウムの需給問題の解決・資源の有効利用を精密計測機器に適用した。

第 2 章では、超電導機器で最も実用化、一般化されている回転式超伝導マグネットに酸化物超電導を適用することを目的として、磁気分離用大口径 Bi-2223 酸化物超電導マグネット回転式伝導冷却装置の開発を行なった。酸化物超電導の脆弱性を考慮して、コイルの補強対策を行なった。完成した装置を垂直方向と水平方向にして冷却を行い、励磁速度 0.5 A/s で 180 A まで励磁を行なった。結果、いずれに方向でも問題なく励磁が可能であることを確認した。また、回転移動によってコイルの破損等が無いことを確認した。

第 3 章では、磁場方向可変酸化物超電導マグネット装置として、XMCD 計測用超高真空 3 軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置を行なった。磁場発生用コイルは、YBCO 酸化物超電導テープ線材を用いてテーパ状としたコイルユニット 4 個で構成された二軸スプリットコイル構造とした。完成した装置の励磁試験を行なった結果、 0° 、 45° 、 90° の各方向で ± 140 A で 1 T、 ± 170 A で 1.2 T を発生できることを確認した。本装置を使用した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ 薄膜の XMCD スペクトルの磁場角度依存性計測の結果から、本装置が新規 XMCD 計測に有用であることが確認された。

第 4 章では、液体ヘリウムを使用する精密計測機器である MEG を対象とした分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置の開発を行なった。ノイズを軽減するために、ヘリウムコンテナを介した分離供給方式とした。カロリメーターによる計測で得た単体再凝縮能力は 9.6 L/d、100 L ヘリウムコンテナに接続した時の再凝縮率は 7.9 L/dであることを確認した。従来の評価方法である磁気ノイズ計測と、新規評価方法として MEG ファントムによる位置ずれ計測及び聴性誘発磁場計測を行なった。結果、本装置による MEG 計測への影響は見られず、正常に計測が可能ながことが分かった。よって、本装置の分離供給方式が有用であることが分かった。

5.2 今後の展望

第 2 章で述べた Bi-2223 コイルに回転機構を設けて運転したことは、酸化物超電導コイルとして初めての試みであった。NbTi 等の金属超電導マグネット回転式伝導冷却装置は既に市販化されており、様々な実験や産業分野で使用されている。これが酸化物超電導コイルでも実現可能となれば、その温度特性等の利点から、より小型・省電力化した装置が期待される。今後、上記で述べた高磁場発生酸化物超電導マグネットの開発と共に、市販化に向けた回転機構を備えた酸化物超電導マグネット装置の開発を行っていく。

また、第 3 章で述べた二軸のスプリットコイル構造で 2 次元の方向可変磁場を発生させる YBCO コイルは、酸化物超電導コイルとして初めての試みであった。これが成功したことは、今後の酸化物超電導マグネット開発の可能性を一步前進させたと考えられる。また、本コイルを用いて XMCD 計測が可能であることを実証したことは、酸化物超電導コイルの実用化を示す新たな指針となった。将来的には、もう 1 軸のスプリットコイルを追加して 3 次元の方向可変磁場を発生させることが目標である。これによって、より幅広い XMCD 計測の実現が期待できる。また、本研究で得られた成果から、より高磁場

発生が可能な酸化物超電導コイルの開発を進めていき、様々な分野での実用化を目指していく。

これらの酸化物超電導マグネット技術が進められていくことで、将来的には NMR、MRI、超電導リニアなどの金属超電導マグネット機器も、その温度特性を生かした小型化・省電力化や磁場特性を生かした高性能化が期待される。また、現在、研究が進められている超電導電力貯蔵 (SMES)、超電導発電、超電導変圧器、超電導モーター等の実現も期待される。

第 4 章で述べた MEG 用分離供給型液体ヘリウム再凝縮装置は、2 年以上の長期運転を行ってきた。その間、ノイズも無く MEG 計測を行うことが出来たのは大きな成果であったと考えられる。しかし、冷凍機を 2 台使用するために消費電力が大きく、運用費（主に電気代）の面で懸念があった。また、冷凍機 1 台当たりの価格も高額なため、それを 2 台使用することで初期費用も高額となるのがネックであった。また、分離供給方式の装置は、ヘリウムが極低温の細配管内を通過して段階的に冷却・再凝縮されていく構造であり、ガスバック式でないために頻度は多くは無いが、空気の混入によって細配管内が閉塞する問題があった。そこで、これらの問題を解決するために、冷凍機 1 台だけで MEG に適用可能な再凝縮能力を有しており、閉塞を可能な限り軽減することを目的とした新規の MEG 用液体ヘリウム再凝縮装置の開発を進めていく予定である。

MEG 用を含めた小型液体ヘリウム再凝縮装置がより手軽に利用できるようになれば、液体ヘリウムの需給問題が解決されていくことが期待される。また、ヘリウム消費量を抑えることで資源の有効利用と運用コストの削減も期待される。

以上より、現代社会におけるエネルギーと資源の問題の解決に向けた極低温・超電導機器の実用化を実証することができた。開発した 2 種類の酸化物超電導マグネット装置は、どちらも世に無い初めてのものであり、酸化物超電導の実用化を大きく前進させたものと考えられる。また、液体ヘリウム再凝縮装置の詳細設計を明らかにして、ユーザー視点に立った評価を行なったことは、今後の再凝縮装置開発の発展に貢献できたものと考えられる。

研究業績

主要掲載論文

- 1) Jun-ichi Fujihira, Akira Uchida, Sei-ichi Fujihira, Mitsuho Furuse, Makoto Okano, Shuichiro Fuchino, Toshiharu Kadono, Kouhei Yoshimatsu, Atsushi Fujimori, Hiroshi Kumigashira and Tsuneharu Koide: “Development of cryocooled YBCO vector magnet system with three-axial super-high vacuum bores,” TEION KOGAKU **48** (2013) 233-238

藤平潤一，内田公，藤平誠一，古瀬充穂，岡野眞，淵野修一郎，門野利治，吉松公平，藤森淳，組頭広志，小出常晴：「超高真空 3 軸ボア付伝導冷却型 YBCO ベクトルマグネット装置の開発」，低温工学（査読有り） **48** (2013) 233-238

- 2) Jun-ichi Fujihira, Jun Kawai, Masanori Higuchi, Yoshiaki Adachi, Daisuke Oyama, Hisanao Ogata and Gen Uehara: “Operation of a liquid helium recondensing system for MEG - Assessment of noise from the system in MEG measurements - ,” TEION KOGAKU **49** (2014) 379-384

藤平潤一，河合淳，樋口正法，足立善昭，小山大介，尾形久直，上原弦：「MEG 用液体ヘリウム再凝縮装置の運転—MEG 計測における雑音評価—」，低温工学（査読有り） **49** (2014) 379-384

関連論文

- 1) M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori and T. Koide: “Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet,” Applied Superconductivity, IEEE Trans. **22** (2012) 3900504 (査読有り)
- 2) M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori and T. Koide: “HTS vector magnet for magnetic circular dichroism measurement,” Applied Superconductivity, IEEE Trans. **23** (2013) 4100704 (査読有り)
- 3) D. Oyama, J. Hatta, M. Miyamoto, Y. Adachi, M. Higuchi, J. Kawai, J. Fujihira, N. Tsuyuguchi and G. Uehara: “Investigation of magnetic interference induced via gradient field coils for ultra-low-field MRI Systems,” Journal of Physics: Conference Series **507** (2014) 042030 IOP Publishing (査読有り)

学術講演(国際会議)

- 1) M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori and T. Koide: “Design and fabrication of HTS coils for a vector magnet,” 22nd International Conference on Magnet Technology, Marseille, France, September 12-16, 2011
- 2) G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, K. Yoshimatsu, A. Fujimori, T. Koide, H. Kumigashira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, and S. Fujihira: “Magnetic properties of manganese oxide thin films studied by angle-dependent soft x-ray magnetic circular dichroism, ” 13th JapanKorea-Taiwan Symposium on Strongly Correlated Electron Systems (JKT-13), Osaka, January 15-17, 2012

- 3) J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, S. Fujihira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: "Development of cryo-cooling system with threeaxial super-high vacuum bores for HTS vector magnet," 24th International Cryogenic Engineering Conference - International Cryogenic Materials Conference (ICEC24), Fukuoka, May 14-18, 2012
- 4) M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, A. Uchida, J. Fujihira, S. Fujihira, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: "An HTS vector magnet for magnetic circular dichroism measurement," Applied Superconductivity Conference 2012, Portland, Oregon, USA , October 07-12, 2012
- 5) J. Fujihira, A. Uchida, S. Fujihira, M. Furuse, M. Okano, S. Fuchino, T. Kadono, A. Fujimori, and T. Koide: "Operation of cryo-cooled HTS vector magnet system with three-axial supuer-high vacuum bores," Applied Superconductivity Conference 2012, Portland, Oregon, USA , October 07-12, 2012
- 6) G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, K.Yoshimatsu, A. Fujimori, T. Koide, H. Kumigashira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, and S. Fujihira: "Anisotropic spin polarization and orbital distortion in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by angle-dependent x-ray circular and linear dichroism, " International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES'13), Tokyo, August 5-9, 2013
- 7) G. Shibata, T. Kadono, K. Ishigami, T. Harano, Y. Takahashi, K. Yoshimatsu, A. Fujimori, T. Koide, H. Kumigashira, M. Furuse, S. Fuchino, M. Okano, J. Fujihira, A. Uchida, K. Watanabe, H. Fujihira, and S. Fujihira: "Orbital and spin states of ferromagnetic $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ thin films studied by angle-dependent x-ray magnetic circular/linear dichroism," Light and Particle Beams in Materials Science 2013 (LPBMS2013), Tsukuba, August 29-31, 2013

- 8) D. Oyama, J. Hatta, M. Miyamoto, Y. Adachi, M. Higuchi, J. Kawai, J. Fujihira, N. Tsuyuguchi and G. Uehara: “Investigation of magnetic interference induced via gradient field coils for ultra-low-field MRI Systems,” European Conference on Applied Superconductivity 2013 (EUCAS2013), Genova, Italy, September 15-19, 2013

学術講演(国内会議)

- 1) 古瀬充穂, 岡野眞, 淵野修一郎, 内田公, 藤平潤一, 藤平誠一, 門野利治, 藤森淳, 小出常晴:「ベクトルマグネット用 Y 系コイルの試作」, 2011 年度秋季低温工学・超電導学会, 石川県金沢市, 2011.11.9-11
- 2) 芝田悟朗, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 門野利治, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平誠一, 藤平秀幸:「ベクトル型超伝導マグネットを用いた強磁性薄膜 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の角度依存 XMCD」, 日本物理学会 2012 秋季大会, 横浜国立大学, 2012.09.18-21
- 3) 古瀬充穂, 岡野眞, 淵野修一郎, 内田公, 藤平潤一, 藤平誠一, 門野利治, 藤森淳, 小出常晴:「Y 系導体を用いたベクトルマグネット」, 2012 年度秋季低温工学・超電導学会, 岩手県盛岡市, 2012.11.7-9
- 4) 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平秀幸, 藤平誠一:「ベクトル型超伝導マグネットを用いた強磁性薄膜 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の角度依存 XMCD」, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 名古屋大学, 2013.01.12-14

- 5) 門野利治, 石上啓介, 芝田悟朗, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平秀幸, 藤平誠一:「ベクトル型超伝導マグネットを用いた XMCD 測定装置の開発」, 第 26 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 名古屋大学, 2013.01.12-14
- 6) 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平秀幸, 藤平誠一:「強磁性薄膜 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の角度依存 X 線磁気円二色性および X 線磁気線二色性」, 物構研サイエンスフェスタ, つくば, 2013.3.14-15
- 7) 芝田悟朗, 門野利治, 石上啓介, 原野貴幸, 高橋文雄, 吉松公平, 藤森淳, 小出常晴, 組頭広志, 古瀬充穂, 淵野修一郎, 岡野眞, 藤平潤一, 内田公, 渡邊和訓, 藤平誠一, 藤平秀幸:「強磁性薄膜 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{MnO}_3$ の角度依存 X 線磁気円二色性および X 線磁気線二色性」, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013.3.26-29
- 8) 藤平潤一, 河合淳, 尾形久直, 上原弦:「MEG 用液体ヘリウム再凝縮装置」, 第 28 回日本生体磁気学会, 新潟県新潟市, 2013.6.7-8
- 9) 小山大介, 宮本政和, 足立善昭, 樋口正法, 河合淳, 藤平潤一, 露口尚弘, 上原弦:「超低磁場 MRI 装置における傾斜磁場コイルから誘導される磁気ノイズの検証」, 第 28 回日本生体磁気学会, 新潟県新潟市, 2013.6.7-8
- 10) 藤平潤一, 河合淳, 尾形久直, 上原弦:「MEG 用液体ヘリウム再凝縮装置の運転」, 第 74 回応用物理学会春季学術講演会, 同志社大学, 2013.9.16-20
- 11) 藤平潤一, 河合淳, 樋口正法, 小山大介, 尾形久直, 上原弦:「MEG 用液体ヘリウム再凝縮装置の運転」, 超伝導エレクトロニクス研究会 (SCE), 東京, 2014.01.23

- 12) 藤平潤一，小山大介，河合淳，樋口正法，足立善昭，尾形久直，
上原弦：「校正されたファントムによる MEG 用液体ヘリウム再凝
縮装置の雑音評価」，第 29 回日本生体磁気学会，大阪大学，
2014.5.29-30

特許(国内)

- 1) 古瀬充穂，岡野眞，淵野修一郎，藤森淳，門野利治，藤平潤一，藤平誠一，内田公，藤平秀幸：「磁場発生装置および磁気分光測定装置」，特願 2012-41922，出願日 2012.2.28

謝辞

本研究は金沢工業大学上原弦教授のご指導のもとに行われたものです。完成までの長期にわたって終始変わらぬご指導とご鞭撻を賜り、心より御礼申し上げます。

本論文の作成に際し、副査として懇切なる御指導を賜りました金沢工業大学遠藤和弘教授、上田修教授、小原健司教授ならびに豊橋技術科学大学田中三郎教授に深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し、金沢工業大学樋口正法教授、河合淳教授、足立善昭准教授ならびに小山大介講師には本研究遂行のために実験について多くの有益なご教示と詳細なご検討を頂き、深く感謝申し上げます。

金沢工業大学尾形久直教授には、長年にわたって極低温分野における研究・技術についてご指導とご鞭撻を賜り、深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し、東京大学藤森淳教授ならびに大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構小出常晴氏には、XMCD 計測及び XMCD 計測用マグネット装置について貴重且つ有益なご意見を賜り、深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し、(独)産業技術総合研究所淵野修一郎主任研究員、岡野真氏ならびに古瀬充穂研究員には酸化物超電導に関して多大のご指導と詳細なご検討を頂き、深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し、(株)フジヒラ藤平誠一代表取締役には、業務その他多岐に渡るご配慮、ご支援を頂き、また、本研究遂行のために実験について多くの有益なご教示を頂き、深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に際し、(株)フジヒラ内田公、藤平秀幸ならびに(株)FEDLIC 渡邊和訓各氏には、多大のご助言、ご支援を賜り、深く感謝申し上げます。

2015 年 3 月 藤平 潤一