

JAERI-M
93-072

40kA級Nb₃Al導体・直状サンプル実験結果

1993年3月

高橋 良和・杉本 誠・磯野 高明・押切 雅幸
細野 史一・和田山芳英・佐々木知之・塙 博美
関 秀一・若林 宏・檜山 忠雄・安藤 俊就
辻 博史

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993
編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

40kA級Nb₃Al導体・直状サンプル実験結果

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

高橋 良和・杉本 誠・磯野 高明・押切 雅幸
細野 史一・和田山芳英・佐々木知之・塙 博美
関 秀一・若林 宏・檜山 忠雄・安藤 俊就
辻 博史

(1993年2月26月受理)

核融合実験炉のトロイダル磁場コイル用導体として、40kA級Nb₃Al導体を開発し、その通電実験を行った。Nb₃Alは現在主流であるNb₃Snより機械的特性に優れているが、製作方法が困難であるため、実用化されなかったが、ジェリーロール法により、はじめて実用化した。

実験の結果、ITERの仕様値を上回る、磁場11.2Tにおいて、46kAまで通電することができた。これにより、Nb₃Sn導体とほぼ同レベルに達したので、Nb₃Alは、トロイダル磁場コイル用導体の第一候補となることが、期待できる。

Experimental Results of 40-kA Nb₃Al Conductor

Yoshikazu TAKAHASHI, Makoto SUGIMOTO, Takaaki ISONO, Masayuki OSHIKIRI
Fumikazu HOSONO, Yoshihide WADAYAMA, Tomoyuki SASAKI, Hiromi HANAWA
Shuichi SEKI, Hiroshi WAKABAYASHI, Tadao HIYAMA, Toshinari ANDO
and Hiroshi TSUJI

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 26, 1993)

40-kA Nb₃Al conductor was developed for the toroidal field (TF) coils of the experimental fusion reactors. Presently, Nb₃Sn is mainly used for high-field superconductor (more than 12 T) and is commercially available in a various type. On the other hand, the critical current (I_c) degradation of the Nb₃Al was only 5% under an intrinsic axial strain of 0.4%, according to the experimental results. In case of Nb₃Sn, the degradation was 30%. Therefore, it is shown that Nb₃Al has excellent mechanical performance and is very useful for the toroidal field coil which are operated under large electromagnetic force. However, Nb₃Al is not practical use at present due to the difficulty of its fabrication.

This conductor could be operated up to the current of 46 kA at an external field of 11.2 T, which was the required field of the TF coils in the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). According to this development, Nb₃Al will become a useful superconductor for large-scale, high-field application, such as the fusion machine.

Keywords: Nb₃Al, Superconductor, Toroidal, ITER, Critical Current, Transformer, Jelly-roll

目 次

1.はじめに	1
2.40kA級導体	4
2.1 素線	4
2.2 導体	4
3.実験装置とサンプル	9
3.1 実験装置	9
3.2 サンプル	9
4.準備作業	12
4.1 サンプル組立と安全管理	12
4.2 計測系準備作業	14
5.冷凍機の運転状況とクールダウン	19
6.実験装置の運転状況	21
6.1 電源運転記録	21
6.2 S Pコイルのクエンチ状況	21
6.3 超電導トランスとサンプルのジョイント抵抗	22
7.実験結果	37
7.1 臨界電流値	37
7.2 常電導伝搬速度	38
8.まとめ	53
謝辞	55
参考文献	55

Contents

1. Introduction	1
2. 40-kA Nb ₃ Al Conductor	4
2.1 Strand	4
2.2 Cable	4
3. Experiment	9
3.1 Facility	9
3.2 Sample	9
4. Preparation	12
4.1 Setup of Sample and Safety	12
4.2 Instrumentation Wires and Sensors	14
5. Operation of Refrigerator and Cooldown	19
6. Operation of Facility	21
6.1 Experimental Record	21
6.2 Quench of SP-coils	21
6.3 Joint Resistance between Superconducting Transformer and Sample	22
7. Results and Discussion	37
7.1 Critical Current	37
7.2 Propagation Velocity	38
8. Concluding Remarks	53
Acknowledgements	55
References	55

1. はじめに

現在のところ、高磁界用超電導材は Nb₃S₆が主流であるが、機械的歪に弱いという欠点がある。これと比較すると、Nb₃A₁は歪による超電導特性の劣下の小さいということは良く知られているので、特に大きな電磁力が発生する核融合実験炉のトロイダル磁場（T F）コイル用導体として非常に有望である。しかし、これまで、製作方法が困難であるために、実用化されていなかった。このことに注目して、超電導磁石研究室では、Nb₃A₁導体の開発を1986年より進めてきた。

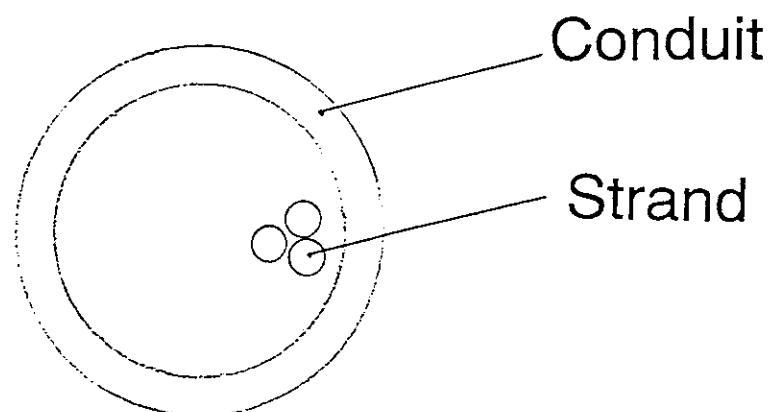
開発されたNb₃A₁素線を用いた10kA級導体において、その臨界電流値の導体軸方向の歪による影響を測定した。この10kA級導体の主要諸元と断面図を、それぞれ表1. 1と図1. 1に示す。測定結果を図1. 2に示す。国際熱核融合実験炉（ITER）の概念設計（CDA）によると、製作中及び運転中において導体に加わる最大軸方向歪は0.4%である。軸方向歪0.4%において、Nb₃A₁の臨界電流値の劣下率は、約5%であるのに対して、Nb₃S₆のそれは、約30%であり、Nb₃A₁の6倍である。この事からも、Nb₃A₁がNb₃S₆と比べて機械的に優れた特性を有することが示された。^{1, 1, 1, 2)}

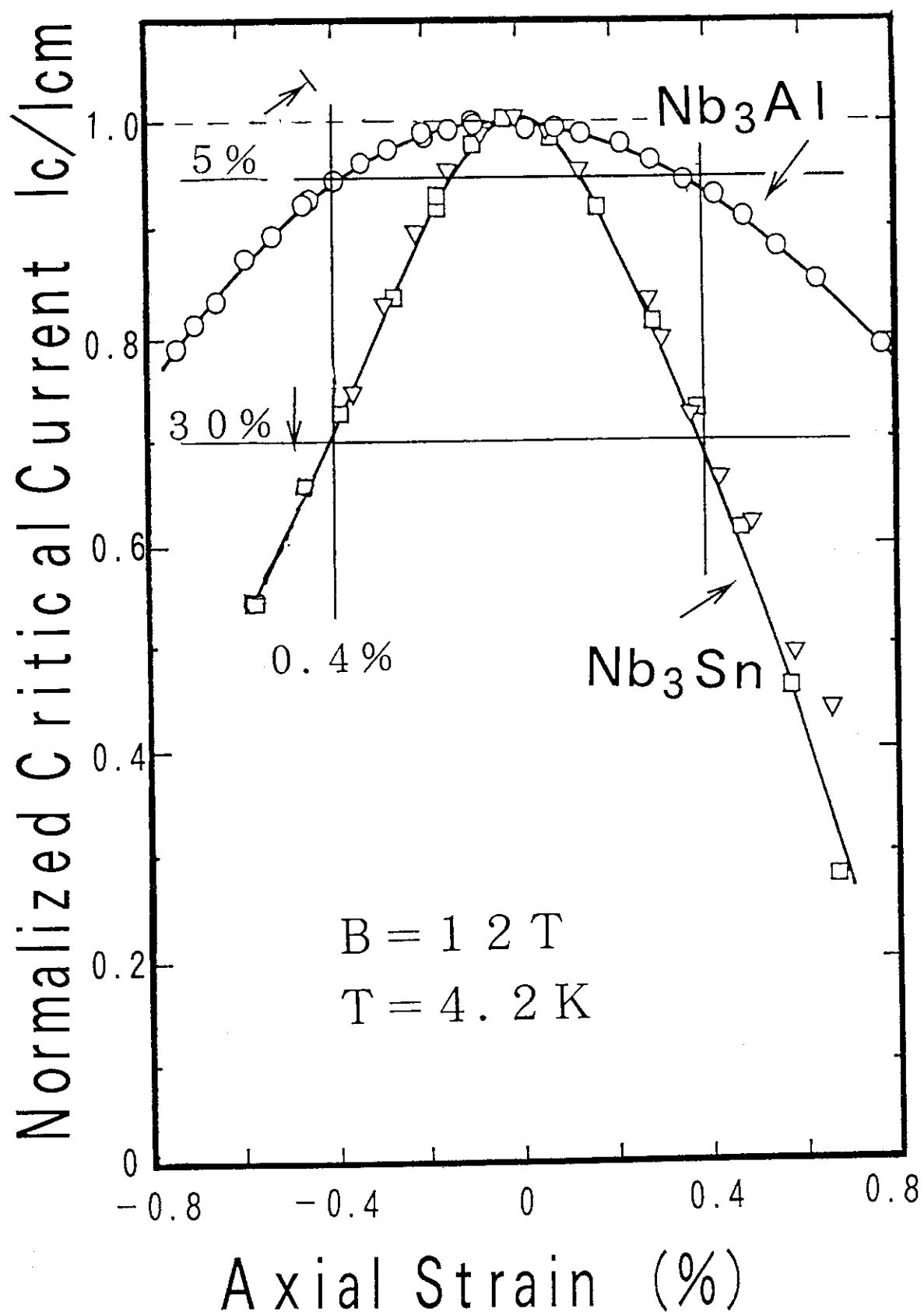
さらに、この素線を用いて、40kA級Nb₃A₁導体を製作し、外部磁界1.1Tから1.2.5Tにおける通電試験及び臨界電流値の測定を行った。これらの実験の準備から結果をまとめたものが、本メモである。

表1.1 臨界電流値の歪特性測定用Nb₃Al導体（10kA）の主要諸元

<u>Cable</u>	
Number of Strands	36(3x3x4)
Outer Diameter	10.1 mm
Conduit	S.S.304
<u>Strand</u>	
Diameter	1.02 mm
Cu/non-Cu Ratio	2
Number of Filaments	588
Filament Diameter	24 μm

Nb₃Al Ic-Strain Sample

図1.1 臨界電流値の歪特性測定用Nb₃Al導体（10kA）断面

図1.2 10kA級 Nb_3Al と Nb_3Sn 導体の臨界電流値 (I_c) の歪特性

2. 40kA級導体

2. 1 素線

本素線は、ジェリー・ロール法 (Jelly-Roll) により製作された。その製造工程を、図2. 1に示す。まず、NbシートとAlシートを無酸素銅の芯に巻き付けたものを、無酸素銅のパイプに入れて、伸線し、単線を製作する。588本の単線を、無酸素銅のマトリックス及びパイプの中に入れて、さらに伸線する。この素線に、所定の熱処理を行うことにより、Nb, Al素線が製作される。製作された素線の断面写真を、図2. 2に主要諸元を、表2. 1に示す。第3章において示すサンプルといっしょに熱処理された素線の臨界電流密度 (J_c) の測定結果を、図2. 3に示す。本素線の J_c は、 $418 \text{ A/mm}^2 @ 12 \text{ T}$ ($537 \text{ A/mm}^2 @ 11.2 \text{ T}$) であるが、最近のR&Dの結果、 $500 \text{ A/mm}^2 @ 12 \text{ T}$ ($650 \text{ A/mm}^2 @ 11.2 \text{ T}$) まで向上している。これが、 $700 \text{ A/mm}^2 @ 12 \text{ T}$ 近傍まで向上すれば、十分、Nb, Snを越えることができる。

2. 2 導体

本導体は、前節に示された素線を405本 ($3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 5$) 摺り合わせたものに、ステンレス・テープ（幅：10mm、厚さ：0.15mm）を巻き付けて、それをCuNiパイプの中に挿入して、伸線したものである。製作された導体の断面写真及び主要諸元を、図2. 4及び表2. 2にそれぞれ示す。

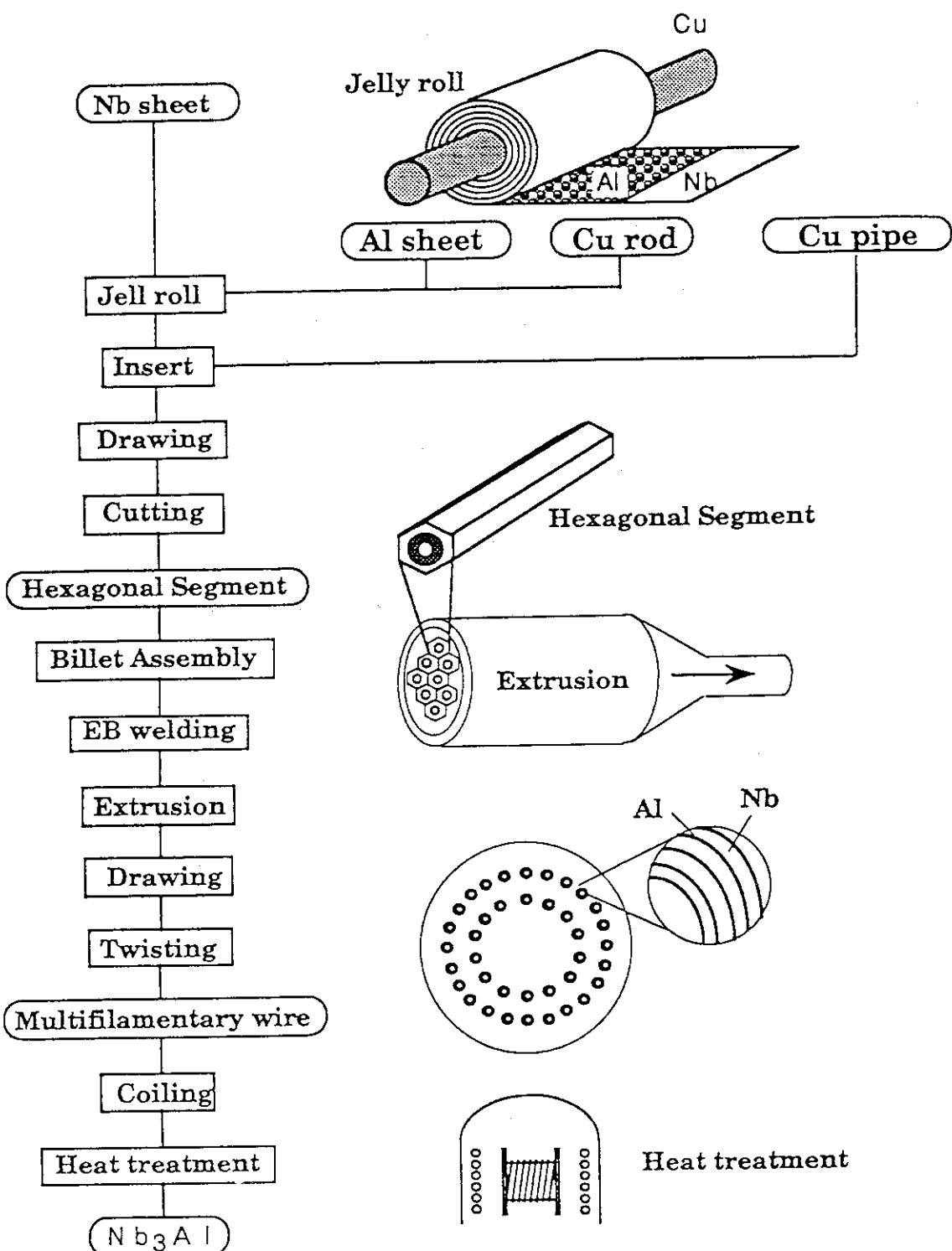
表2.1 Nb₃Al素線の主要諸元

・外径	1.02 mm
・銅比	2
・フィラメント数	588
・フィラメント外径	24 μm
・フィラメント内径	10 μm
・Nb層厚さ	300 nm
・Al層厚さ	80 nm

表2.2 Nb₃Al導体の主要諸元

・外径	29 mm
・コンジット材料	Cu-Ni
・コンジット厚さ	1.7 mm
・ボイド率	35%
・素線数	405 (3 ⁴ × 5)

Fabrication Process of Nb₃Al

図2.1 ジェリーロール法Nb₃Al素線の製造過程

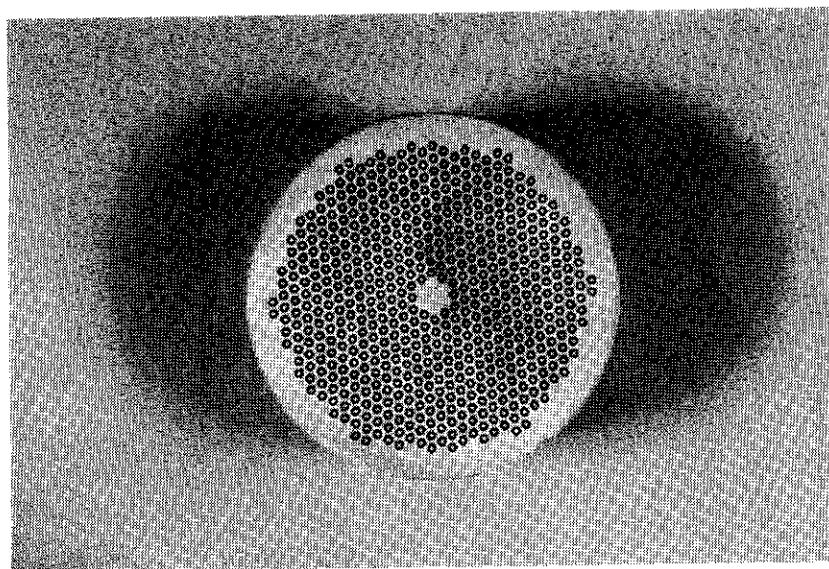


図2.2 ジェリー・ロール法により製造されたNb₃Al素線の断面写真

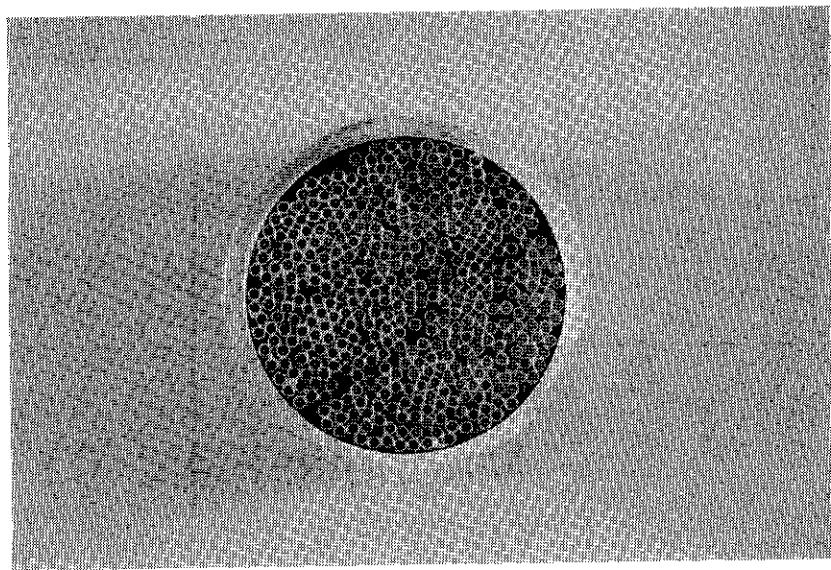


図2.4 40kA級ケーブル・イン・コンディット型Nb₃Al導体の断面写真

CRITICAL CURRENT DENSITY OF Nb_3Al STRAND

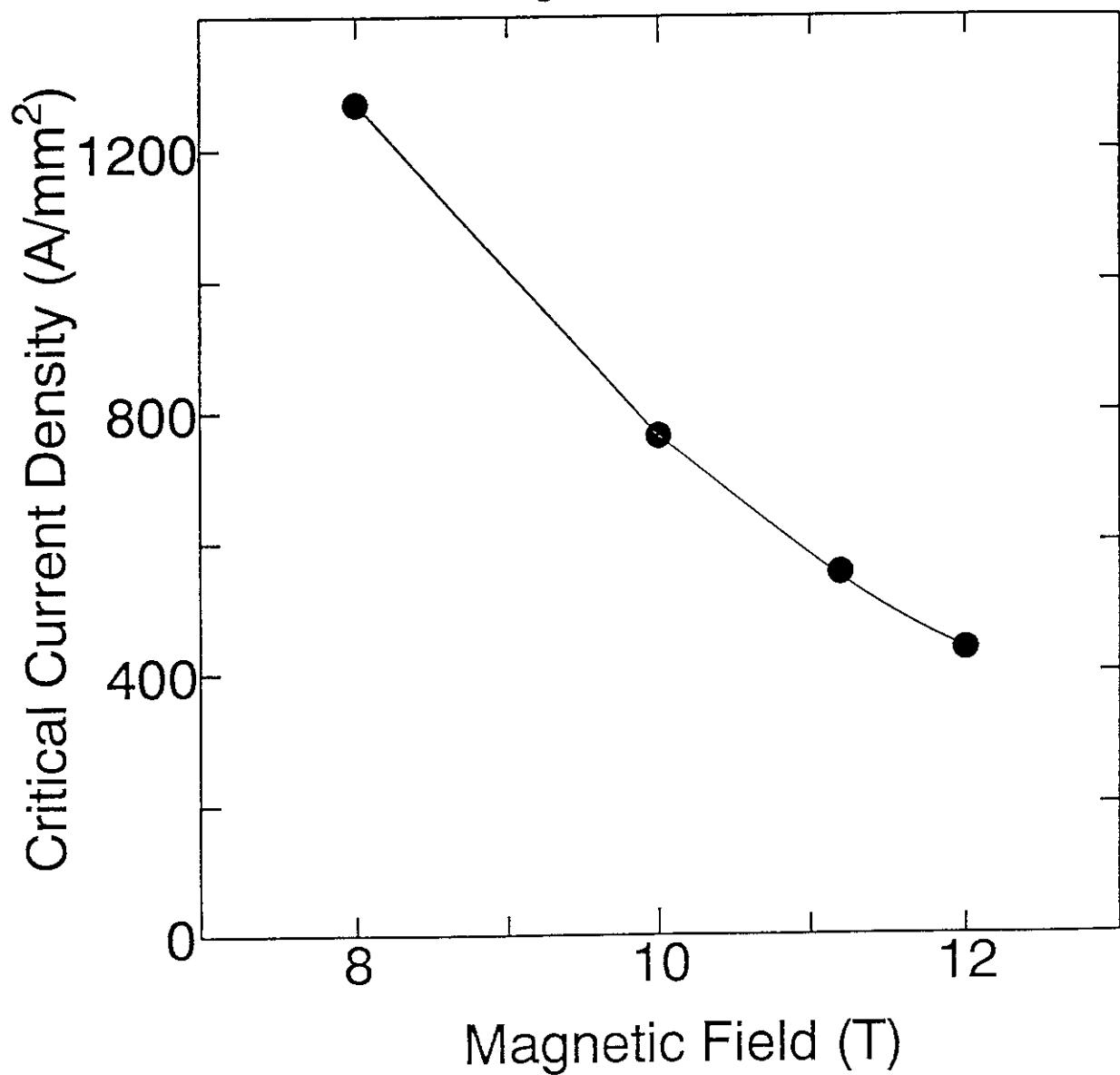


図2.3 製造された Nb_3Al 素線の臨界電流密度(J_c)測定結果

3. 実験装置とサンプル

3. 1 実験装置^{3), 1)}

サンプル導体の臨界電流値 (I_c) 及び安定性を測定するための装置を、図 3. 1 に示す。サンプル導体に磁場 12.5 Tまで印加する 2 組の超電導スプリット・コイル (SBC, SP-15) と、電流 100 kAまで通電する超電導トランスで構成されている。超電導スプリット・コイルは、低磁場側（外側）の SBC と呼ばれる NbTi コイルと、高磁場側（その内側）の SP と呼ばれる Nb, Sn コイルで構成される。それぞれのサンプル導体の中心における発生磁場は、SBC が通電電流値 1600 Aで 8 T、SP が通電電流値 736 Aで 4.5 Tであり、両方合わせて、12.5 Tになる。この時、SP 卷線部における最高発生磁場は、13.9 Tである。超電導トランスは、その 1 次側に約 6 kA 通電することにより、2 次側すなわちサンプル導体に 100 kA 通電することが出来る。

これらの装置は、液体ヘリウムの中に漬けられて、実験が行われる。液体ヘリウムを溜める FRP デュアは、内径 2 m、深さ約 2.7 m であり、実験時には、約 3000 L 溜められる。

3. 2 サンプル

本サンプル導体の形状を、図 3. 2 に示す。サンプルには、電圧タップが 12 個、誘導型ヒータが 1 個取り付かれている。電圧タップ 12 個のうち、4 個は超電導トランスと取合である電流ターミナル（ジョイント部）に、残り 8 個は導体のコンジットに取り付けられている。

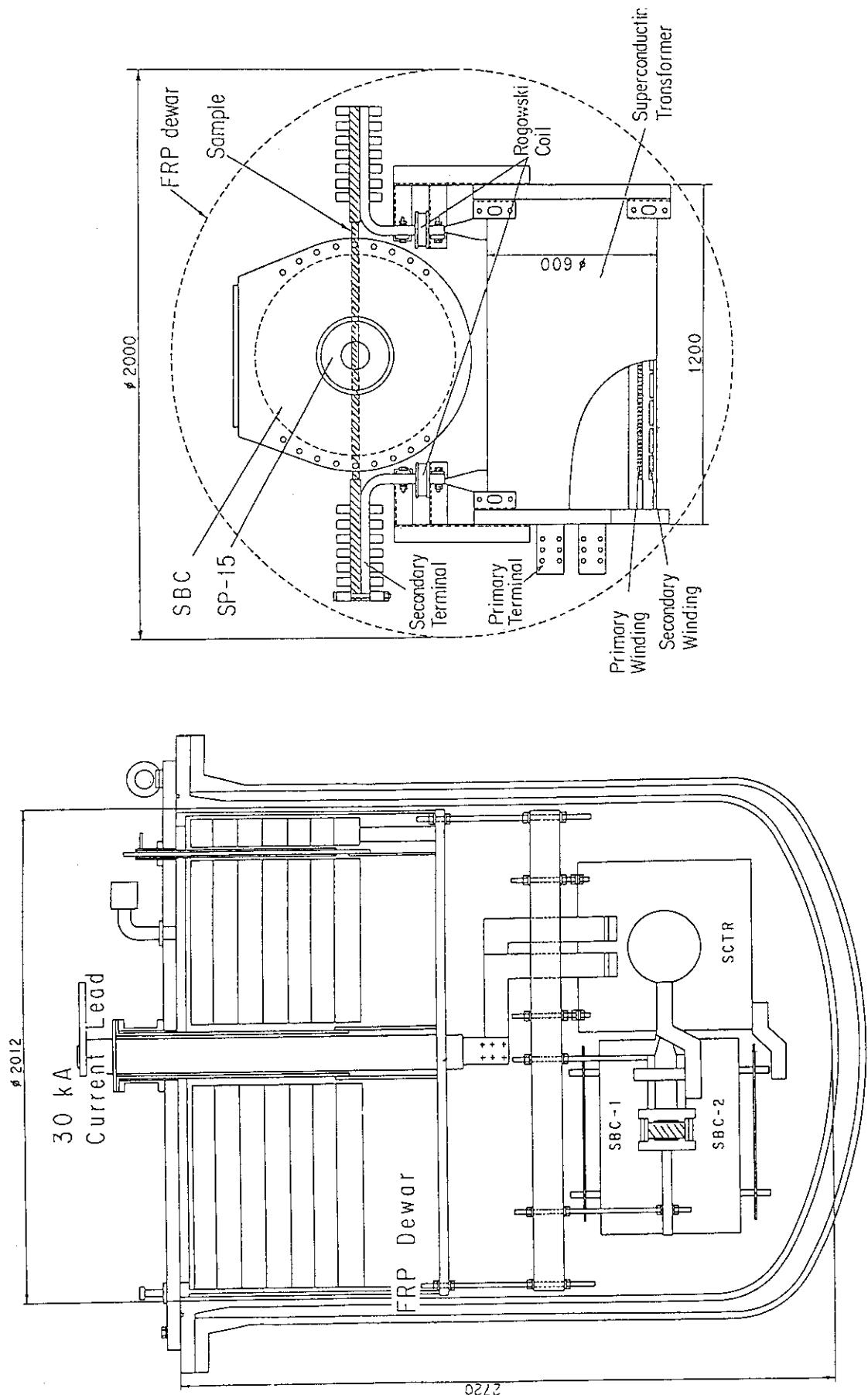
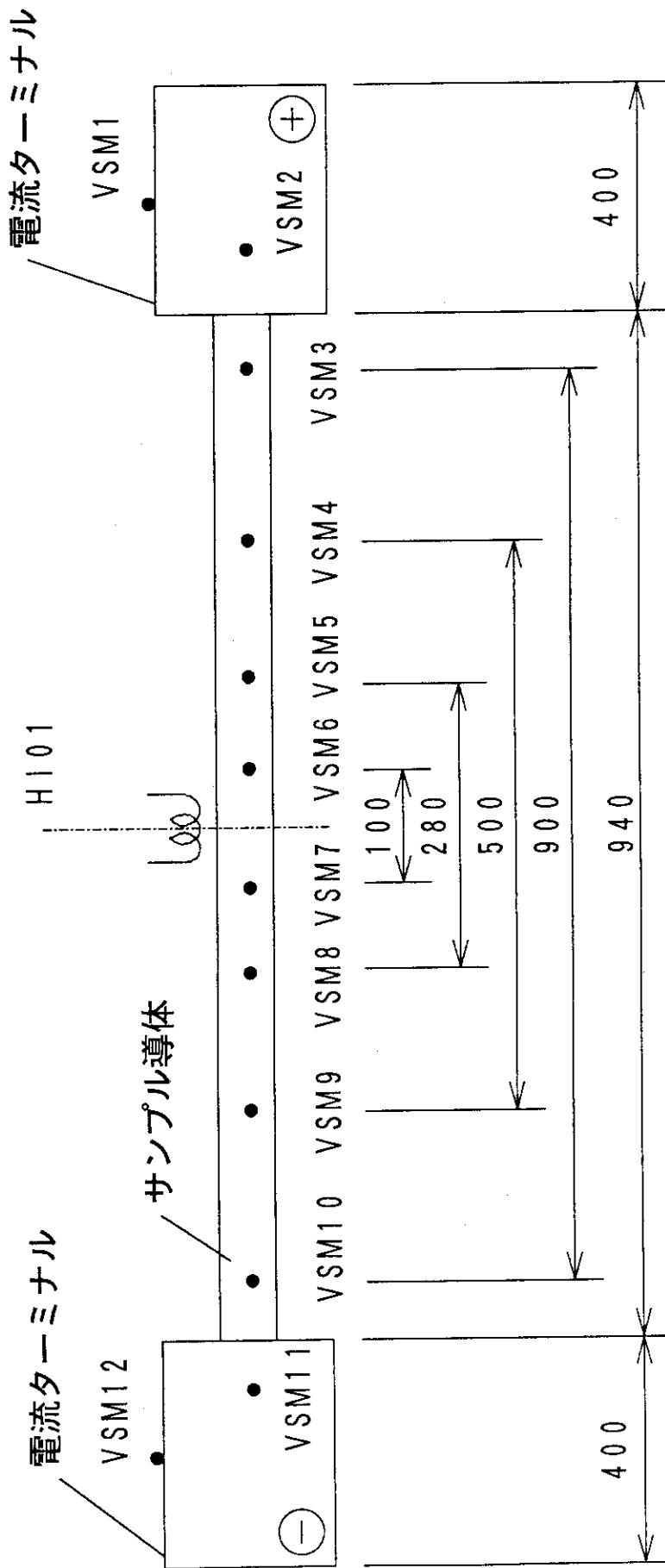


図3.1 直状サンプル実験装置（超電導スプリット・コイルと超電導トランジスタ）

図3.2 40kA級Nb₃Al導体サンプル形状及び素子配置

4. 準備作業

4. 1 サンプル組立と安全管理

サンプルを実験装置（超電導トランスとスプリット・コイル）に組み込む過程を図4. 1に示す。①まず、スプリット・コイルの下部を組立台の上に置く。②その上にサンプルとスプリット・コイル間のスペーサ（ステンレス製）を置く。この時、サンプルの電流ターミナルが重いので、サンプル導体がたわまないよう支持をする。また、サンプルが動かないように、スペーサとサンプルの間にF R P板を挿入する。③さらに、その上にスプリット・コイルの上部を置いて、上下のスプリット・コイルをボルトで締結する。④超電導トランスの電流ターミナルとサンプルの電流ターミナルが合うように、超電導トランスを置く。⑤これらの上に、吊り下げ治具をボルトで所定の位置に取り付ける。⑥吊り下げ治具をフランジに吊り下げる。超電導トランスの電流ターミナルとサンプルの電流ターミナルの間にインジウム・シート（厚さ0.5 mm）を挟んで、ステンレス製締結治具（クランプ）で締結する。その後、超電導トランスとスプリット・コイルを治具で締結する。

超電導磁石研究室における中型実験（直状Ic、3ターンコイル等）は、数度にわたり実験が行われているため、準備作業は、ほぼ定量化したものと思われる。しかし、初めて実験準備作業に加わった者からみると、危険な作業をこれまでの経験と感から作業を行っており、準備作業の災害ポテンシャルが撲滅されたわけではない。特に、慣れきった作業者や初めて作業を行う者は災害を起こす可能性は高い。室内においてもこうした観点から、災害防止を図るために本実験から安全担当者を儲けると同時に作業前に危険予知を行うことが決まった。

そこで、本実験準備作業を始めるに当たって、準備作業に係わる危険とその対策を各作業者から指摘してもらった。本章においては、今後の準備作業においても同様の災害ポテンシャルが潜んでいることから、今後の災害防止に役立てるためにその内容について記述した。

A. 実験準備作業工程

(1) トランス解体、サンプル準備	4月1日（水）～4月3日（金）
(2) サンプル組立、内部配線、吊り込み	4月6日（月）～4月8日（水）

B. 実験準備作業前の注意事項及びその対策の洗いだし

（作業前の注意事項洗いだしは、後半のみ行われた。）

— 4月6日 —

作業項目

（1）計測線接続

(2) SBC、SP電流リード半田付け

注意事項及び対策

- | | |
|------------------------|-------------|
| (1) 半田付け作業中の火傷 | - (対策) 皮手着用 |
| (2) 床面に置かれた工具につまずき転倒 - | 整理整頓 |
| (3) 計測線接続作業時の頭上注意 | - ヘルメット着用 |
| (4) トップフランジからの工具の落下 - | " |

- 4月7日 -

作業項目

- | | |
|-------------------------------------|--|
| (1) 計測線接続 | |
| ①サンプル電圧②温度計③ヒータ④SP電圧⑤トランス電圧⑥ロゴスキーパー | |
| ⑦ピックアップ⑧液面計⑨ヒータ(HR) | |
| (2) 30kAブスバー固定 | |

注意事項及び対策

- | | |
|----------------------|----------------|
| (1) 計測線接続作業時の頭上注意 | - (対策) ヘルメット着用 |
| (2) " | 整理整頓 |
| (3) トップフランジ上での高所作業 - | ヘルメット着用、足場の確保 |
| (4) 手、足の怪我 | 保護具(軍手等)の着用 |

- 4月8日 -

作業項目

- | | |
|--------------------------|--|
| (1) コイルのFRPデュアーネへの吊り込み作業 | |
| (2) 冷凍配管取り付け | |
| (3) ブスバー取り付け | |
| (4) メタルデュアーノの移動 | |

注意事項及び対策

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| (1) チェーンブロック | - 吊り目的以外のものを吊らない。 |
| (2) クレーン使用時の落下物 | - クレーンの下にはいらない。 |
| (3) メタルデュアーノの移動作業 | - 脚立4台使用において足場があまりない。
(支持必須) |
| (4) ブスバーライン30kA通電中のため注意 | - トロロープを張る。 |
| (5) FRPデュアーノ拭き | - 酸欠注意 |
| (6) 吊り込み作業 | - お互いに声を掛け合う。(重要!) |

C. 所感

実験準備作業の危険予知を行うにあたって、お互いに危険なポイントを確認し合うことが出来たことはプラスになったと思う。特に、今回の作業においても初めての参加者がおり、何が危険なのか判断が付かないものにとっては危険予知

は災害防止に役立ったと思う。各人が多少戸惑いを見せたのは確かであるが、これから繰り返し行うことで、円滑に進と同時に各人が素早く危険を予知できるようになると考へる。

今回は、全工程を通して行うことが出来なかつたので、全工程を通して危険予知を行うよう次回の安全担当者にはお願ひしたい。

4. 2 計測系準備作業

計測系準備作業は、以下のような手順で行った。デュア-内部の計測配線は、チェックを含めて2日間、外部はフランジのフィードスルーからレコーダまでの配線とチェックで、約2.5日間掛かった。本作業の重要なチェック・ポイントであるコイル吊り込み前に行われる検査（コイル及びサンプルの抵抗値測定、計測素子等の検査及びコイル等の絶縁抵抗の測定）の結果を、表4.1、4.2、4.3に示す。

4月 2日(木)	<ul style="list-style-type: none"> ・前サンプルの吊り出し ・前サンプルの解体 ・サンプル加工 (T C取付、ヒータ巻等) ・計測配線図作成
3日(金)	<ul style="list-style-type: none"> ・サンプル・トランス組立 ・計測配線図作成
6日(月)	<ul style="list-style-type: none"> ・電流リード、ハンド付 ・内部計測配線取付
7日(火)	<ul style="list-style-type: none"> ・内部計測配線取付 ・<u>内部配線等チェック</u> *
8日(水)	<ul style="list-style-type: none"> ・外部計測配線取付 (P D 6) ・レコーダー、DM配線
9日(木)	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>コイル吊り込み</u> ・外部計測配線取付
10日(金)	<ul style="list-style-type: none"> ・外部配線等チェック ・アンプ調整・設定

注) * 表4.1、4.2、4.3を参照のこと。

表4.1 コイル及びサンプルの抵抗値測定結果

S A M P L E	20.03A	S P - 1 5	1.02A	S B C	1.02A
V T S 1	基 点	V P L 2	基 点	V B L 2	基 点
V S M 1	-0.012mV	V P 1	0.72 mV	V B 1	0.125mV
V S M 2	0.015	V P 2	0.860	V B 8	2.786 V
V S M 3	0.098	V P 3	886	V B 9	2.786
V S M 4	0.369	V P 4	886	V B 1 6	5.575
V S M 5	0.504	V P 5	886	V B L 3	5.575
V S M 6	0.614	V P 6	886		
V S M 7	0.734	V P 7	6.511 V	VB1-8	2.785 V
V S M 8	0.842	V P 8	6.511	VB9-16	2.787
V S M 9	0.980	V P 9	6.512	VB8-9	0.31 mV
V S M 1 0	1.253	V P 1 0	6.531	VB16-VBL3	0.47
V S M 1 1	1.347	V P 1 1	12.147	VBL1-2	0.17
V S M 1 2	1.358	V P 1 2	12.147	VBL3-4	0.19
V T S 2	1.354	V P 1 3	12.146		
S C T R		10.03A	V P 1 4	12.147	
V T L 1	基 点	V P 1 5	断線		
V T L 2	0.180 mV	V P 1 6	13.034		
V T P 1	0.480	V P L 3	13.035		
V T P 2	2.275 V				
V T L 3	2.276				
V T L 4	2.276				
S A M P L E		20.03A			
VSM1-VTS1	0.001mV				
VSM1-VTS2	1.358				
VSM12-VTS2	-0.005				

表4.2 計測素子等検査結果

温度			液面		
T C 0 1	+V-V	3.86 K Ω	L I 0 1	+V-V	480 Ω
	+I-I	6.50		+I-I	485
	+V+I	1.37		+V+I	6.3
	-V-I	1.33		-V-I	3.8
	7-S	∞		7-S	∞
			L I 0 2	+V-V	479 Ω
				+I-I	484
				+V+I	6.4
				-V-I	4.0
				7-S	∞
T U 0 1	+V-V	56.30 Ω	ホール素子		
	+I-I	56.30	F H 0 1	+V-V	2.90 Ω
	+V+I	2.50		+I-I	3.20
	-V-I	2.30		+V+I	3.00
	7-S	∞		-V-I	3.00
T U 0 2	+V-V	56.40 Ω	F H 0 2	7-S	
	+I-I	56.40		+V-V	3.30 Ω
	+V+I	2.50		+I-I	3.40
	-V-I	2.50		+V+I	3.40
	7-S	∞		-V-I	3.90
ヒータ				7-S	
H I 0 1	L	58.5 μ H	ロゴスキ・ピックアップコイル		
	R	0.29 Ω	V T C 1	+-	2.00 Ω
H R 0 1	R	37.3 Ω		7-S	
			V T C 2	+-	2.00 Ω
				7-S	
			F P 0 1	+-	2.062 Ω
				7-S	

表4.3 絶縁抵抗値測定結果

N b , A 1	テスター	2 5 0 V 5 0 MΩ 以上	5 0 0 V 1000MΩ 以上	1 K V 200MΩ 以上	テスター
S B C - アース	∞	∞	∞	∞	∞
S P - アース	320 K Ω	0.15 MΩ	0.5M以下	—	240 K Ω
ヒーター - アース	∞	∞	∞	∞	∞
T R 1 - アース	∞	∞	∞	∞	∞
サンプル - アース	∞	∞	∞	∞	∞
サンプル - S B C	∞	∞	∞	∞	∞
サンプル - S P	∞	∞	∞	∞	∞
サンプル - T R 1	∞	∞	∞	∞	∞
サンプル - ヒータ	∞	∞	∞	∞	∞
ヒーター - S P	∞	∞	∞	∞	∞
ヒーター - S B C	∞	∞	∞	∞	∞

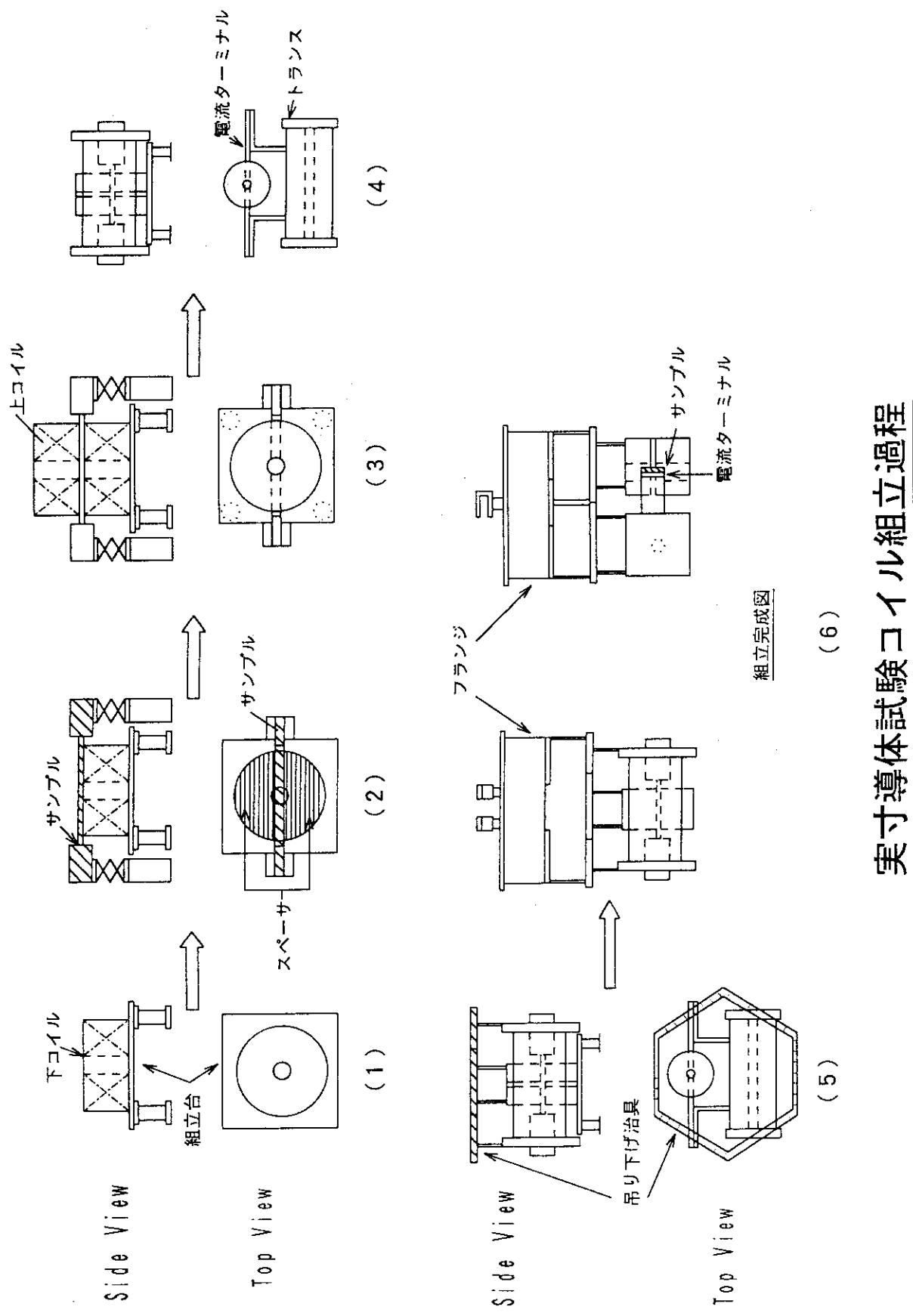


図4.1 サンプル組立工程

実寸導体試験コイル組立過程

5. 冷凍機の運転状況とクール・ダウン

5. 1 精製

クール・ダウンに先立ち、試験装置（CB60）の真空引き、Heガス置換及び冷凍機による精製運転を実施した。最終的な系内純度は次の通りである。

O₂ : 検出されず 水分（露点） : -80°C以上

精製運転は約9時間で終了した。尚、精製運転中電流リード部、計測配管部等のガス溜り部について10分間ずつのバージを2回実施した。

5. 2 初期冷凍

初期冷凍は、冷凍機（1.2KW at 4.5K）からCB60戻り温度150Kまでは80K冷媒を、150K以下の温度領域では2台のタービン膨張機による発生寒冷および戻り寒冷をコールド・ボックスに回収する操作により30K以下の冷媒を供給して行った。冷媒流量は約10～20g/sである。この流量は主としてCB60内圧により制限される。供給冷媒温度15K、戻り温度30Kとなったところで初期冷凍を終了とした。初期冷凍時間24hr、平均予冷速度は11K/hrである。供給温度、戻り温度、流量の時間経過を図-5.1に示す。

5. 3 液体ヘリウム移送

初期冷凍に引き続き、冷凍機は20,000L液体ヘリウム貯槽（R90）への液化モードに移行し、R90からCB60への初期注液を4時間行った。この間の注液率は約500L/hrである。本注液は初期冷凍の最終仕上げとしての意味を持つ。CB60への本格的な液溜めは、上記の液送率を1,000L/hr以上にUPすることにより行い通電実験可能なレベルまでの液溜めをした。

CB60貯液量は約3,200L、液送時間4.5hr、液送効率64%であった。以後、実験の期間中、液送量の調整により通電実験に必要な液位の保持を行った。

5. 4 ヘリウム、液体窒素使用量

本実験運転（実験終了後のR90液化運転を含む）期間中のガス使用量を次に示す。

ヘリウム・ガス
液体窒素

31M³
34,200L (4,880L/day)

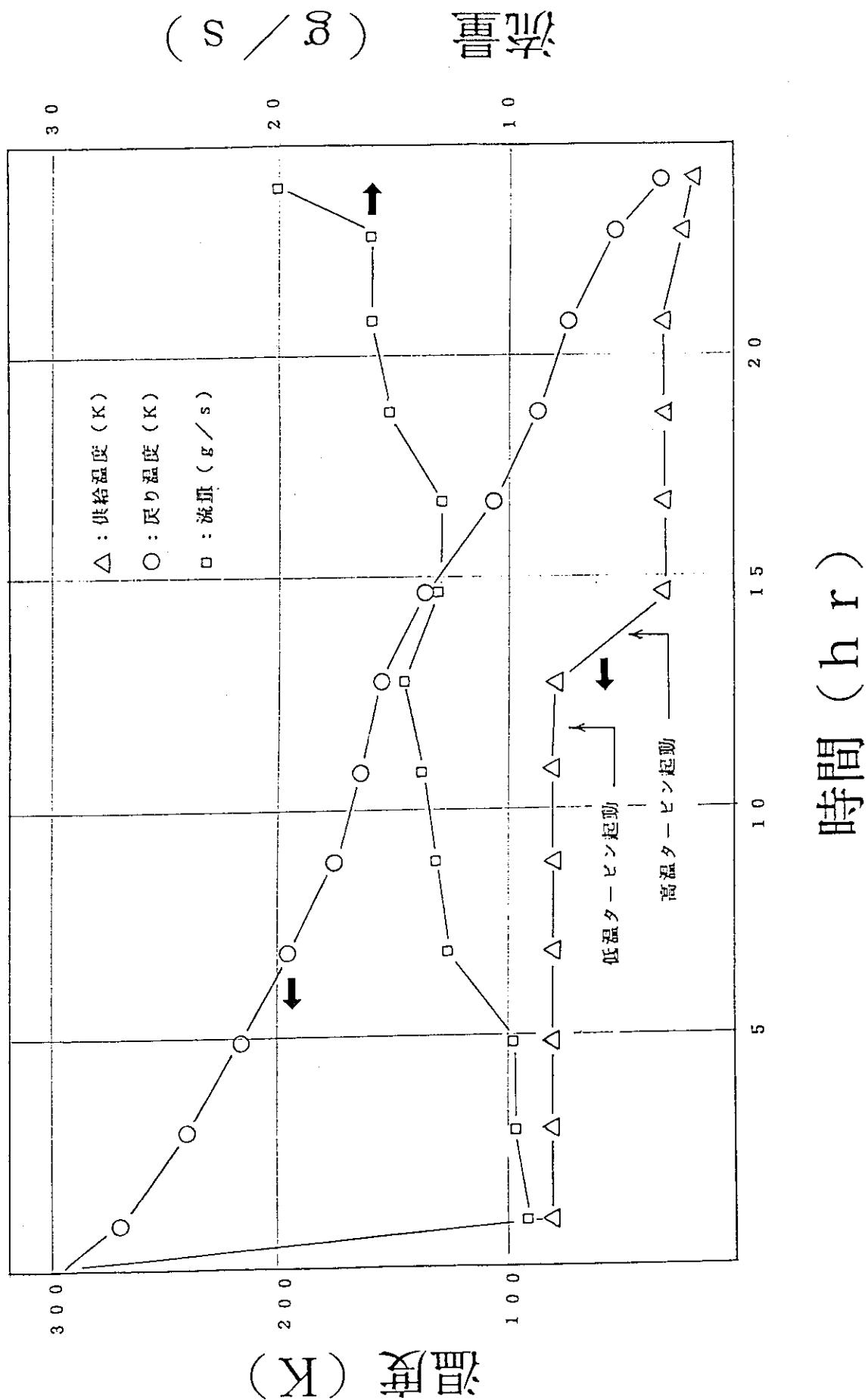


図5.1 クール・ダウン曲線

6. 実験装置の運転状況

6. 1 電源運転記録

本実験において、使用された電源とその設定値を、表6. 1に示す。サンプル導体に、100kAまで通電するために、超電導トランスが用いられた。このトランスは、1次側に6kAの電流を通電すると、2次側（サンプル導体）に約100kA通電することが出来る。この1次側に通電する電源は、12V-30KA直流電源（DCPS）である。また、サンプルに12.5Tまでの磁場を印可するための2組の超電導スプリット・コイル（SBC、SP-15）に通電する電源は、それぞれ300V-3.2kA直流電源（DCPS）と10V-1kA直流電源（DCPS）である。これらのコイルの掃引速度を、表6. 2に示す。サンプルの通電記録を、表6. 3に示す。

6. 2 SPコイルのクエンチ状況

6. 2. 1 はじめに

本実験において、サンプル導体の超電導特性を調査する為にバックアップ・コイルとしてSPコイル及びSBCコイルの2組の超電導スプリット・コイルを用いた。今回は、サンプル（Nb₃Al直状）導体の中央部に最大12.5Tの磁場を発生させた。

今回の実験において、サンプル導体に磁場を印加したあと、通電試験を行ない、その時、サンプル導体がクエンチを起こした後、バックアップ・コイルのSPコイルがクエンチを起こすことが数回あった。ここでは、これらのクエンチの原因について検討を行ったので報告する。

6. 2. 2 検討対象試験データ

今回の実験において、SPコイルは6回クエンチした。すべてSP-2（サンプルの上）コイルがクエンチした。その内、表6. 4に示す4回について検討した。その他の2回（RUN#1-11、1-12）において、SPコイルの電圧信号をデジタル・メモリー（DM）で計測できなかったので、検討対象から外した。

6. 2. 3 クエンチ状況

図6. 1にバックアップ・コイル（SP、SBC）とサンプル導体の配置図を示す。図6. 2に、典型的なバックアップ・コイルのクエンチ波形（RUN#2-6-1）を示す。サンプル導体であるNb₃Al直状導体がクエンチし、サンプル通電電流がダウンし始めてから約8秒後、SPコイルは、電圧タップVP13-16間（高磁界側）よりノーマルが発生し、約1秒後SPコイルがクエンチに至っている。また、表6. 1に、サンプル導体がクエンチを起こしてからSPコイルがクエンチをするまで

の時間を示す。しかし、サンプル導体がクエンチを起こさなかった時（RUN#2-10-1）、S Pコイルがクエンチに至っていない。これらの結果から、S Pコイルがクエンチに至ったのは、サンプル導体のクエンチと密接な関係があることが推測される。

6. 2. 4 クエンチ発生原因

図6. 2及び表6. 5に示すようにS Pコイルのクエンチは、ほぼコイルの高磁界側であるVP13-16間からノーマルが発生することによって起こっている。また、クエンチはサンプル導体がクエンチしてから最短でも7.46秒と非常に長い時間を過ぎて発生している。このことより推測すると次のことが原因と考えられる。

サンプル導体がクエンチすることにより導体から発生した熱が液体ヘリウムに伝わり、その発熱により液体ヘリウムが気泡となって、その気泡がS Pコイル内のある所に進入したためでないかと思われる。これは、S Pコイルのクエンチがサンプル導体の上部であるVP13-16及びVP9-13間で発生していることから説明できる。サンプル導体に40kA以上の通電を行ってもサンプル導体自体が発生する磁場は、1T以下であるので、サンプル導体のクエンチにおける磁場の影響は非常に少ない。また、万一サンプル導体の磁場の影響を受けていた場合でも、S Pコイルがクエンチするのに8秒近くもかかるとして考えられない。今回の実験においては、サンプル導体の中央部に設けてある誘導加熱ヒータを固定するためと、サンプル導体が電磁力により、導体に歪がかからないようにエポキシ系樹脂を取り付けたため、発生した気泡が、コイルの内ボア（直径約100mm）を抜けずS Pコイル側に入ったと思われる。

以上のことから判断するとS Pコイルのクエンチは、サンプル導体のクエンチによる発熱からできるヘリウム・ガスの影響であると考えられる。

6. 3 超電導トランスとサンプルのジョイント抵抗

6. 3. 1 はじめに

本試験サンプルはジョイントを介して超電導トランスの2次側と接続されている。このためジョイント部の抵抗に依存して、サンプルを含む閉回路に流れる電流が決ってしまう。ジョイント部の抵抗が小さいほど、サンプルにより大きな電流を供給することができる。如何にジョイント部の抵抗を小さくできるかが、本実験を行ううえで重要な点である。本実験の組立中に行った施工手順と、その結果について以下に示す。

6. 3. 2 組立施工（実験準備）

図6. 3に示すように、サンプルのジョイント部はステンレス鋼製の締結治具（クランプ）によりトランス2次側と締結される。この際、クランプはジョイント1箇所当たり6個（計12個）用いられ、そのボルトの締め付けトルクは100

から $120 \text{ k g f} \cdot \text{cm}$ で管理した。またサンプルとトランスのジョイント部の間にはインジュウム・シートをはさみこみ、抵抗の低減を図った。

6. 3. 3 実験結果

ジョイント抵抗は、VTS1-VSM1（プラス側）の電圧およびVSM12-VTS2（マイナス側）の電圧から求めた。

図6.4にプラス側ジョイントの抵抗（外部磁場0T）を示す。約 $0.25 \text{ n}\Omega$ の抵抗で非常に小さい値である。図中、電流値に対してジョイント抵抗が比例しているのはジョイントの銅部の磁気抵抗及び電流によるジョイント部でのジュール発熱による抵抗増加によるものと思われる。

図6.5にマイナス側ジョイントの抵抗（外部磁場0T）を示す。約 $10 \text{ n}\Omega$ と、プラス側に較べ40倍ほど大きな値となった。また抵抗値の電流依存性はみられない。これは銅の磁気抵抗効果やジュール発熱による抵抗増加に較べ、ジョイント部の抵抗がはるかに大きいためである。

各ジョイントでの発熱量を求めるとき次のようになる。サンプル電流は 40 kA とする。

$$\begin{aligned} \text{プラス側} & 0.25 \text{ n}\Omega \times (40 \text{ kA})^2 \\ & = 0.4 \text{ W} \\ \text{マイナス側} & 10 \text{ n}\Omega \times (40 \text{ kA})^2 \\ & = 16 \text{ W} \end{aligned}$$

図6.6及び図6.7にプラス側及びマイナス側のジョイント抵抗の外部磁場依存性を示す。ただし、横軸の外部磁場は、ジョイント部におけるSBC-SPコイルが発生する平均の値である。SBC-SPコイルの漏れ磁場がそれほど大きくないため、どちらの場合もほぼ一定の値をとる。

本実験での超電導トランスでの一次側と二次側の電流増幅率（Run #1-5）を図6.8に示す。ジョイント抵抗が小さいため非常良い電流増幅率（約18倍）を示した。

またサンプルを含む超電導トランスに次側の閉回路の抵抗を電流の減衰から求める。電流減衰から抵抗は下記の式よりもとまる。

$$I = I_0 \exp(-t/\tau)$$

ここで t : 時間、

I : 時間 t での電流、

I_0 : 初期電流、

τ : トランス二次側（閉回路）の時定数 ($= L_2/R_2$)

L_2 : トランス二次側の自己インダクタンス ($23.7 \mu\text{H}$)

R_2 : トランス二次側（閉回路）の抵抗

Run #1-5のデータをもとに、上式からトランス二次側抵抗 R_2 を求めると、 $R_2 = 11.6 \text{ n}\Omega$ となる。トランス二次側抵抗はジョイント抵抗が支配的であることが分かる。

6. 3. 4 今後

今後の実験に於いては、各ジョイントでの発熱量は定格電流値で1W以下に抑えるのが実験遂行上望ましい。今回の実験ではプラス側のジョイント部がこの基準を満たしている。今後は組立作業で、どの点に注意すればジョイント抵抗を低くできるのかをよく見極める必要がある。

表6.1 使用電源とその設定値

使 用 電 源	設 定 値			
	過 電 壓	過 電 流	Q D 設 定 値	保 護 抵 抗 値
ト ラ ン ス 12V-30KA DCPS	± 10V	8 KA	500mV/0.1sec	6.25mΩ
S B C 300V-3.2KA DCPS	± 100V	2 KA	500mV/0.1sec 200mV/1sec	0.3 Ω
S P - 1 5 10V-1kA DCPS	± 10V	1000A	500mV/0.1sec	0.25Ω

表6.2 S B C 及び S P - 15 の電流掃引速度

	電 流 範 囲 (A)	電 流 掃 引 速 度 (A / s)
S B C	< 1 1 5 0	1
	1 1 5 0 - 1 2 5 0	0. 5
	> 1 2 5 0	0. 2 5
	電 流 範 囲 (A)	電 流 掃 引 速 度 (A / m i n)
S P - 1 5	< 5 0 8	5 0
	5 0 8 - 7 0 0	2 0
	> 7 0 0	1 0

表6.3 サンプル電源の運転記録（1／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I max (KA)	備 考
1-1	1000A	500A/min		UP&DOWN サンプル通電チェック
1-2	1000A	500A/min		"
1-3	1000A	500A/min		"
1-4	1000A	1KA/min		M. DUMP
1-5	5000A	1KA/min		1KA毎に HOLD&UP
1-6	100A	2A/Sec		SBC チェック UP&DOWN
1-7	100A	2A/Sec		SBC チェック M. DUMP
1-8	100A	50A/min		SP フック UP&DOWN
1-9	100A	50A/min		SP フック M. DUMP
1-10	600A 800A	2A/sec 1A/sec		SBC電流UP
1-10-1	5000A	1KA/min	+1.19 ~ 80.8	サンプル通電
1-11	100A	2A/sec		SBC電流DOWN (800A→100A)
	508A 655A	50A/min 20A/min		SP電流UP

表6.3 サンプル電源の運転記録（続き、2／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I _{max} (KA)	備 考
	800A 1150A 1250A 1600A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC電流UP
1-11-1	5000A	1KA/min	+3.54 ~ 30.8	1 2 T サンプル通電
				SP クエイチ
1-12	100A	2A/sec		SBC電流UP
	508A 655A	50A/min 20A/min		SP電流UP
	800A 1150A 1250A 1600A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC電流UP
1-12-1	5000A	500A/min	+5.6 ~ +39.2	1 2 T サンプル通電 SP クエイチ
2-1	1000A	500A/min	0.02 ~ +16.7	サンプル通電チャック UP→HOLD→M. DUMP
2-2	100A	2A/sec		SBC チャック M. DUMP
2-3	100A	50A/min		SP チャック M. DUMP
2-4	100A	2A/sec		SBC電流UP

表6.3 サンプル電源の運転記録（続き、3／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I_{max} (KA)	備 考
	328A	50A/min		SP電流UP
	400A	2A/sec		SBC電流UP
2-4-1	5000A	2KA/min	+3.9 ~ +82.0	4 T サンプル通電 SP クイック
2-5	100A	2A/sec		SBC電流UP
	328A	50A/min		SP電流UP
	400A	2A/sec		SBC電流UP
2-5-1	2000A	2KA/min		4 T サンプル通電 UP&DOWN
5-2	2000A	2KA/min	+3.25 ~ +37	" DOWN=5KA/min
5-3	2000A	2KA/min	+2.1 ~ +36.4	" DOWN=10KA/min
5-4	2000A	2KA/min	+1.1 ~ +35.4	" DOWN=20KA/min
5-5	2000A	2KA/min	+0.2 ~ +34.6	" DOWN=50KA/min
2-5-6	2000A	2KA/min	-0.9 ~ +33.2	4 T サンプル通電 UP&DOWN DOWN=300KA/min
5-7	2000A	2KA/min	-1.7 ~ +31.7	" F.DOWN
5-8	5000A	5KA/min	-2.2 ~ +60.6	" DOWN=50KA/min
				SBC, SP電流DOWN

表6.3 サンプル電源の運転記録（続き、4／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I_{max} (KA)	備 考
2-6	100A	2A/sec		SBC電流UP
	508A 655A	50A/min 20A/min		SP電流UP
	800A 1150A 1250A 1520A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC電流UP
2-6-1	5000A	500A/min	+6.36 ~ 40.2	11.6T サンプル通電 DOWN=50KA/min SP クエンチ
2-7	100A	2A/sec		SBC電流UP
	508A 589A	50A/min 20A/min		SP電流UP
	800A 1150A 1250A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec		SBC電流UP
2-7	1520A	0.25A/S		SBC電流UP
2-7-1	5000A	500A/min	+7.04 ~ +45.3	11.2T サンプル通電 DOWN=50KA/min SP クエンチ

表6.3 サンプル電源の運転記録（続き、5／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I_{max} (KA)	備 考
2-8	100A	2A/sec		SBC 電流UP
	508A 589A	50A/min 20A/min		SP 電流UP
	800A 1150A 1250A 1520A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC 電流UP
2-8-1	5000A	500A/min	+7.17 ~ +45.8	11.2T サンプル通電 $I_{max} \sim 30KA$ 、500A/min 30KA～ 200A/minで電流UP DOWN=50KA/min (SP クエンチ)
2-9	100A	2A/sec		SBC 電流UP
	508A 589A	50A/min 20A/min		SP 電流UP
	800A 1150A 1250A 1520A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC 電流UP

表6.3 サンプル電源の運転記録（続き、6／6）

RUN. #	電流 設定値 (A)	掃引速度	T r 2 次電流 I_{max} (KA)	備 考
2-9-1	5000A	1KA/min	+7.54 ~ +43.8	11.2T サンプル通電 DOWN=50KA/min SP クエンチ
2-10	100A	2A/sec		SBC 電流UP
	508A 700A 736A	50A/min 20A/min 10A/min		SP 電流UP
	800A 1150A 1250A 1600A	2A/sec 1A/sec 0.5A/sec 0.25A/s		SBC 電流UP
2-10-1	5000A	500A/min	+6.10 ~ +34.1	12.5T サンプル通電 DOWN=50KA/min
				SBC, SP 電流DOWN

表6.4 検討対象試験データ

検討対象Run#	SPIコイル電流値 (A)	SBCコイル電流値 (A)	磁場 (T)	サンプル電流 (kA)
2-6-1	655	1520	11.6	40.2
2-7-1	589	1520	11.2	45.3
2-8-1	589	1520	11.2	45.8
2-9-1	589	1520	11.2	43.8

但し) 磁場は、サンプルの中心に発生した値である。

表6.5 サンプル導体がクエンチを起こしてから
S Pコイルがクエンチするまでの時間

検討対象Run#	VP13-16間に電圧が発生 するまでの時間(sec)	VP9-13間に電圧が発生 するまでの時間(sec)	サンプル 電流
2-6-1	7.68	7.90	40.2 kA
2-7-1	7.76	7.91	45.3 kA
2-8-1	----	7.46	45.8 kA
2-9-1	8.57	8.81	43.8 kA

注) ここでは、サンプル電流がダウンし始めた時間を基準にした。

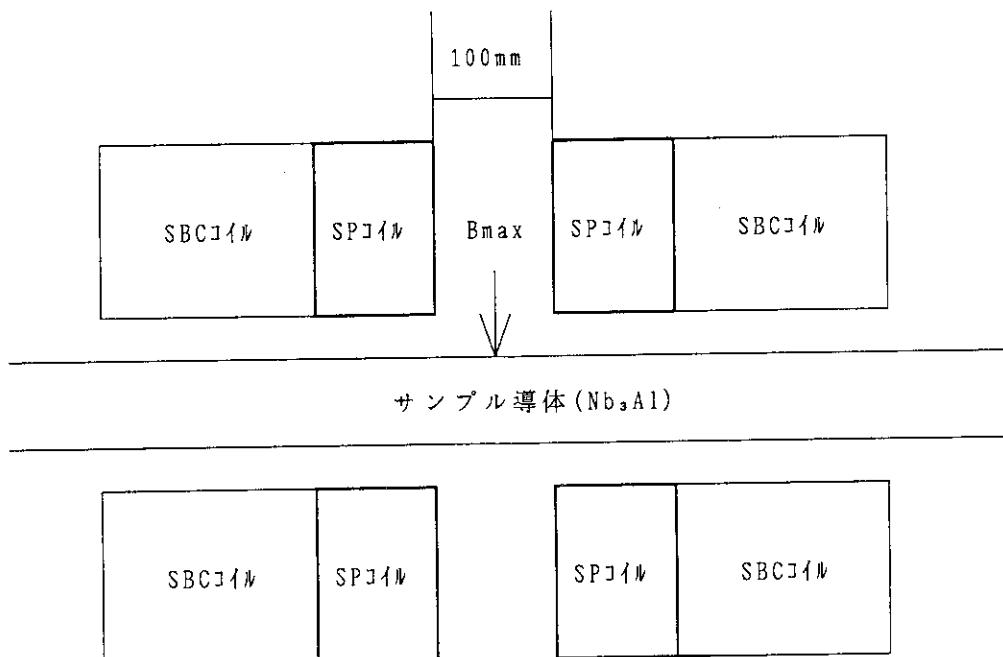


図6.1 サンプル導体とスプリット・コイルの配置

RUN2-6-1(11.6 T)

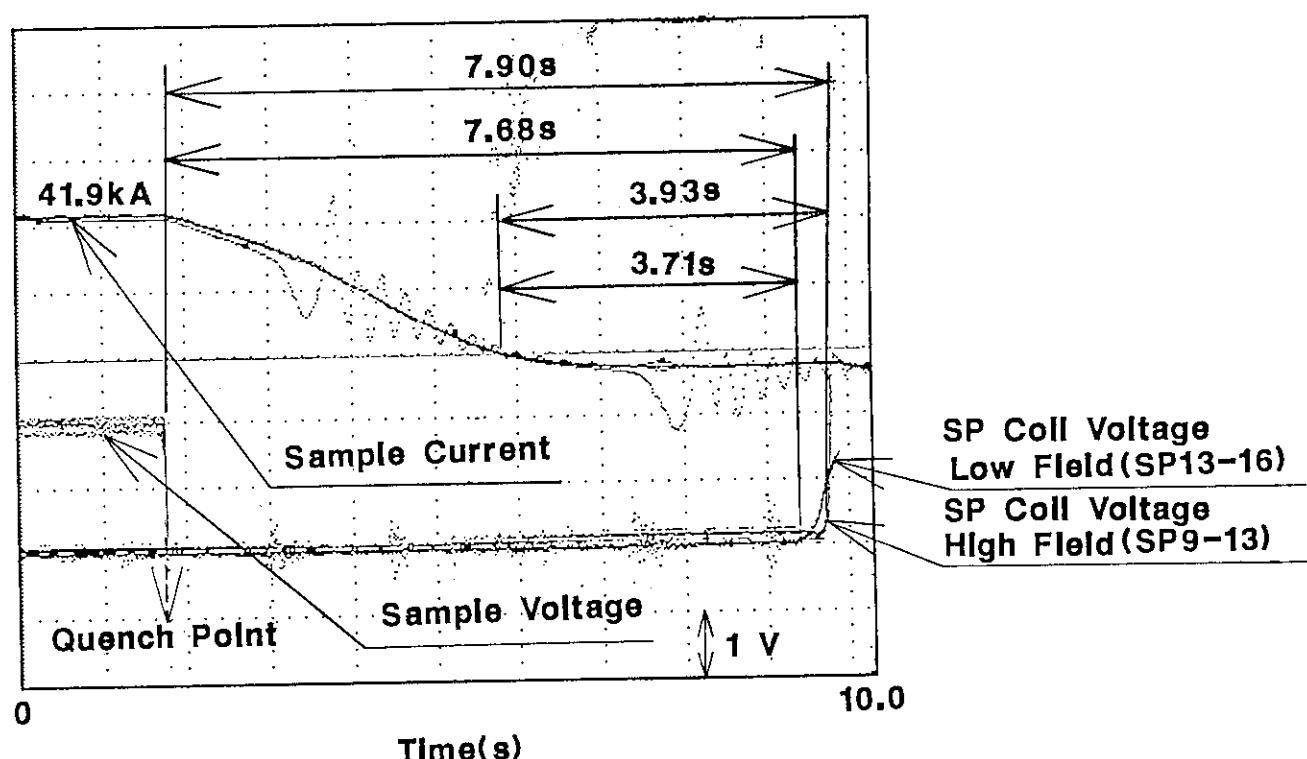


図6.2 クエンチ時の S P - コイルの電圧波形 (RUN#2-6-1)

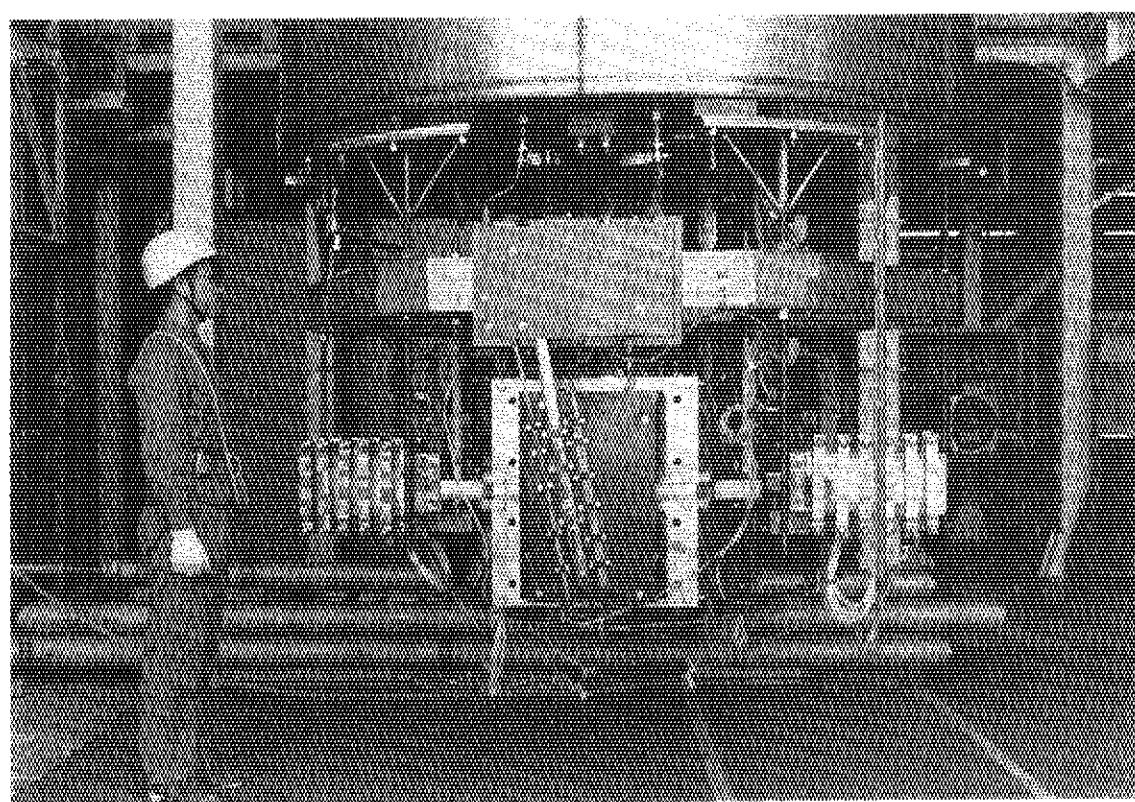


図6.3 超電導トランスとサンプルのジョイント部とスプリット・コイル

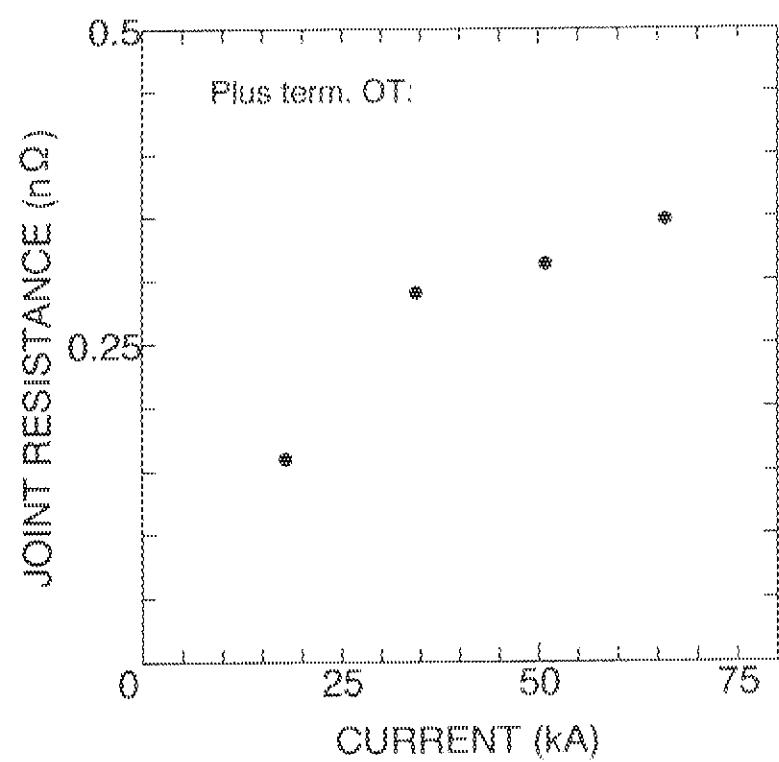


図6.4 プラス側ジョイントの抵抗値と通電電流値の関係(外部磁界: O T)

jntn.prm

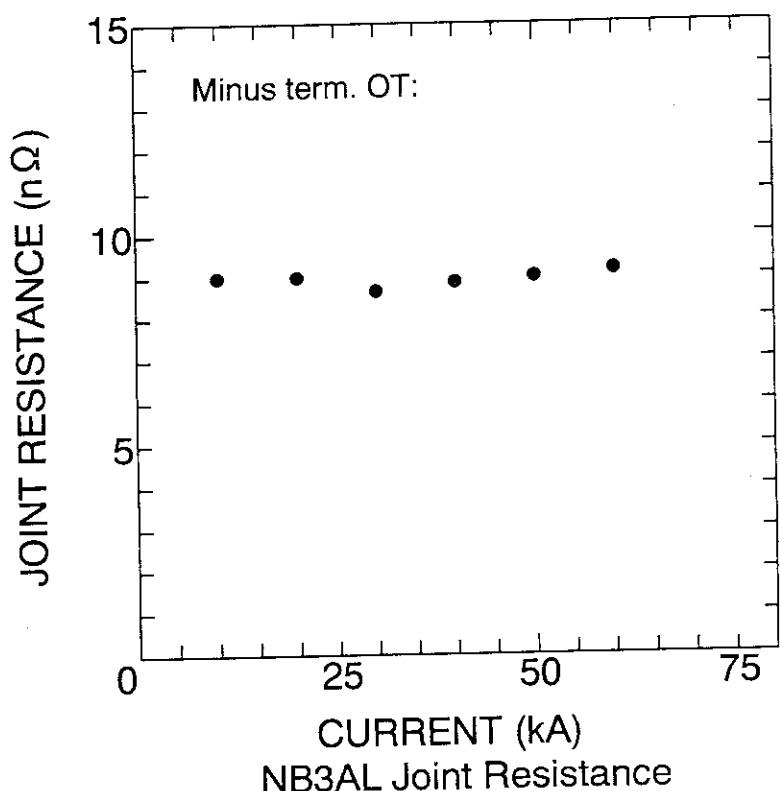


図6.5 マイナス側ジョイントの抵抗値と通電電流値の関係（外部磁界：OT）

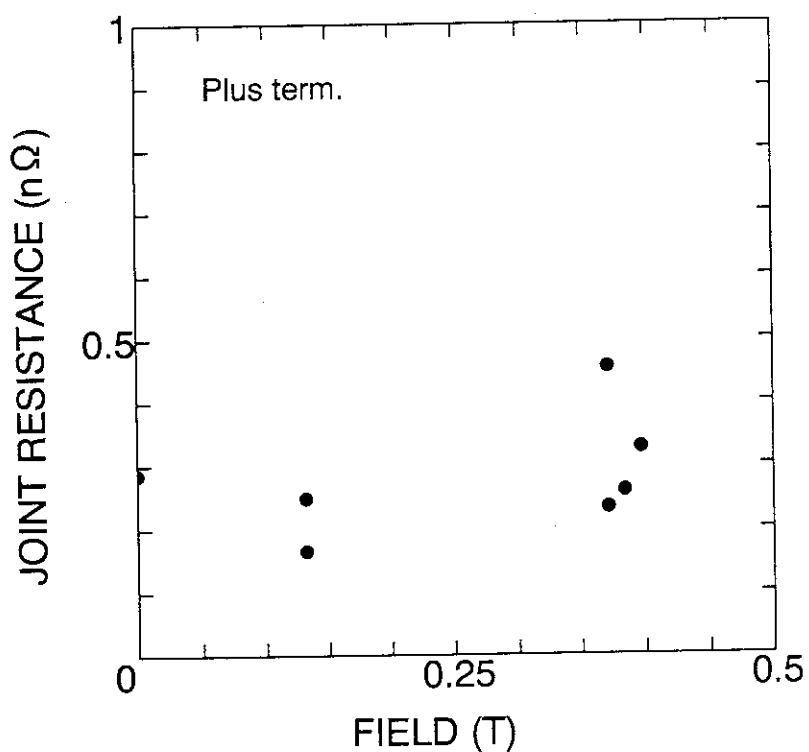


図6.6 プラス側ジョイントの抵抗値と外部磁界の関係

jntn.prm

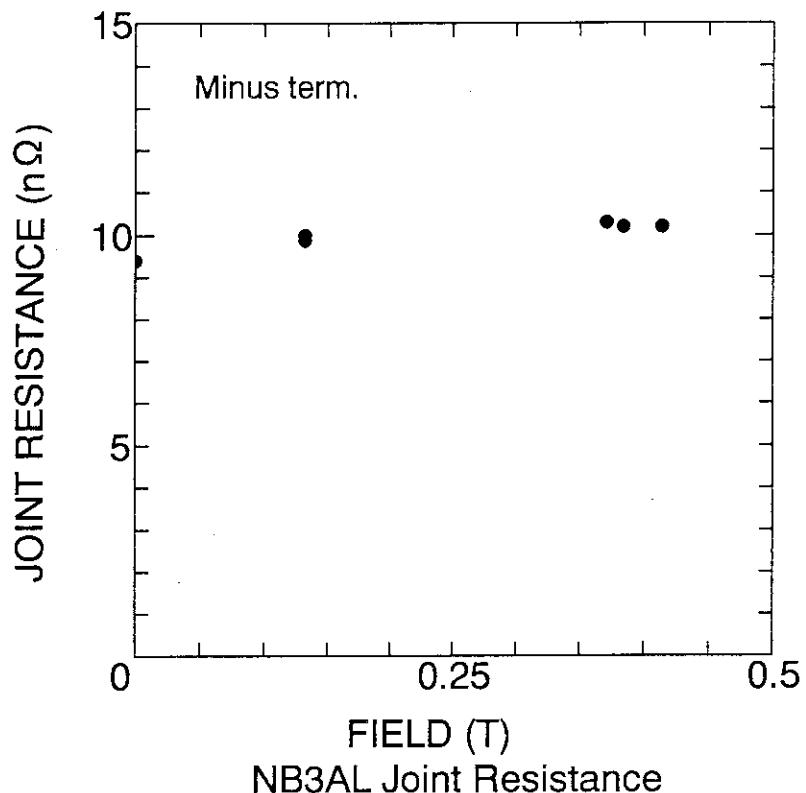


図6.7 マイナス側ジョイントの抵抗値と外部磁界の関係

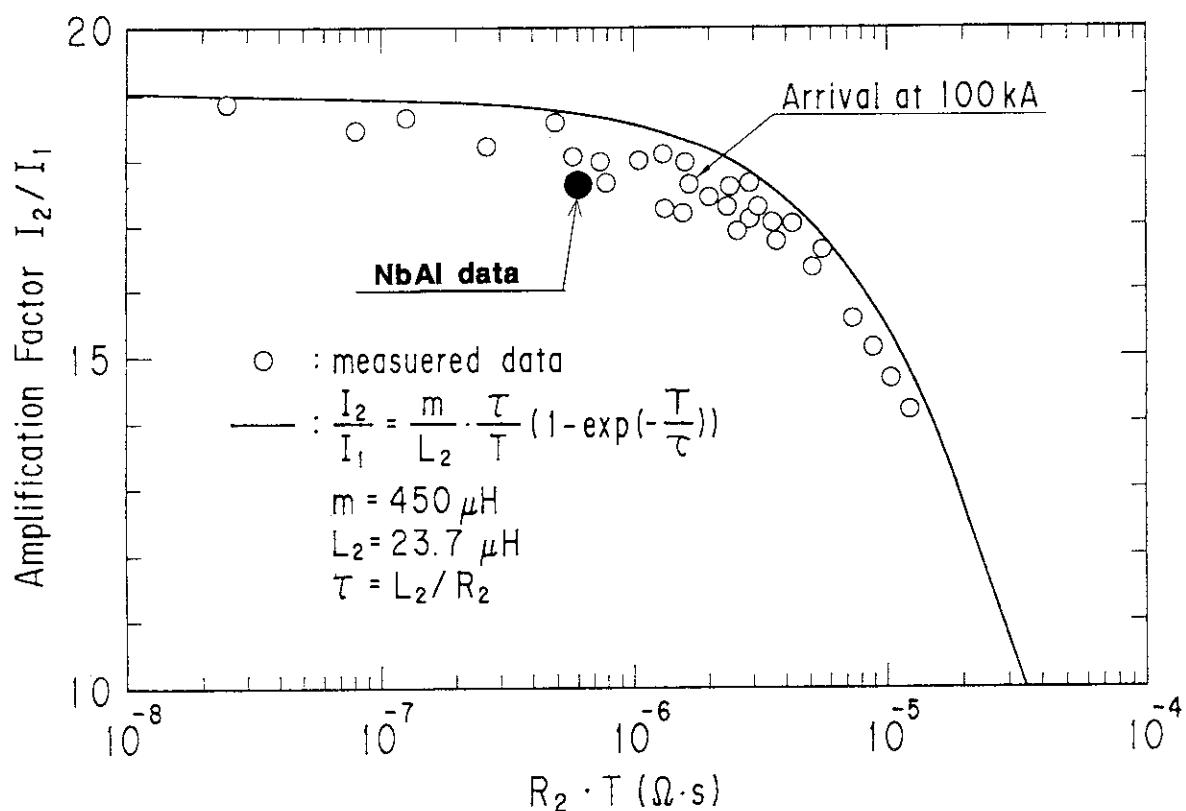


図6.8 超電導トランスの電流増幅係数とジョイント抵抗値の関係

7. 実験結果

7. 1 臨界電流値

7. 1. 1 実験方法

(1) 通電及び励磁方法

サンプルを2次側の超電導トランスに接続した後、30 kA電源から1次側に通電することで2次側に誘導電流が流れ、サンプルに通電出来る。磁界を印加する前に予めサンプルに100 kAまで通電出来ることを確認した上で実験をすすめた。

SPC及びSP超電導スプリット型コイルでサンプルを挟み込み、サンプルに最大磁界12.5 Tまで印加した。

(2) 冷媒条件

本導体サンプルには冷媒導入部が設けていないため、液体ヘリウムによる浸漬冷却とした。

7. 1. 2 通電条件

以下の条件において、臨界電流値 (I_c) を測定した。

- ・外部磁界 B (T) : 11.2, 11.6, 12.0, 12.5
- ・トランス1次側の電流掃引速度 dI/dT (kA/min) : 0.5, 1.02

7. 1. 3 定義及び評価方法

I_c は、以下のように定義した。

- ・直状導体の I_c の定義 : $1 \times 10^{-13} \Omega m$
- ・素線の I_c の定義 : $1 \times 10^{-13} \Omega m, 1 \mu V/cm$ (参考値)

電流-電圧 ($I - V$) 特性から以下の範囲において、 n 値を測定した。

- ・ n 値 : $1 \mu V \sim I_c$ 定義時電圧

サンプル自身が発生する磁界は、次のように求めた。

- ・自己磁界 : $B = \mu_0 I / 2\pi r$ の式よりコンジット内周部の磁界を求めた。 $(I=I_c \text{ or } I_q, r=12.8mm)$

7. 1. 4 実験結果

表7. 1に電圧タップV sm 6-V sm 7間の臨界電流値 I_c 及びクエンチ電流値 I_q 、表7. 2にV sm 5-V sm 8間の I_c 及び I_q を示す。両者の特性を比較するとほとんど差がないため、最大磁界部 (V sm 6-V sm 7) から常電導部が発生していることが推測される。

図7. 1に本サンプル導体の各磁界中の $I - V$ 特性を示す。表7. 1に示されているように高磁界領域において、トランス1次側電流掃引速度 (dI/dt) が0.5 kA/minの時、 I_c 測定が可能であったため、この掃引速度で統一した曲線を記した。図から分かるように外部磁界12 T及び12.5 T中では、 I_c 測定が可能であったが、11.6 T中においては I_c が定義できる直前でクエンチし、さらに11.

2 T 中では常電導部が発生することなくクエンチした。

直状導体の I_c 測定において掃印速度を極力遅くすることはできたが、導体内に強制的に液体ヘリウム等の冷媒を流すことが不能であったため、素線の冷却状態が良くなくてクエンチしたものと思われる。

表7. 3 の素線の臨界電流特性から導体 I_c の劣化率を求めた。その結果を表7. 4、表7. 5、図7. 2、図7. 3 に示す。表7. 4、図7. 2 は、サンプルの自己磁界を無視したが、表7. 5、図7. 3 は、外部磁界と同方向に生ずるサンプルの自己磁界を考慮に入れ、磁界補正して劣化率を求めた。外部磁界 1.2, 5 T 中の導体 I_c を磁界補正すると素線の本数倍した電流値と一致し、劣化率 0 % となる。自己磁界補正しない最悪の場合でもその劣化率は 20 % 以下であり、これまで原研で測定した各種 Nb₃S_n 導体の劣化率（表7. 6）と比較しても劣化が小さいことが分かる。素線の臨界電流特性を図7. 4 に、 $I - V$ 特性を図7. 5 に示す。

超電導線の均質性の 1 つの指標となる n 値を直状導体及び素線について、それぞれ求めた。導体の n 値を表7. 1 及び7. 2 に、素線の n 値を表7. 3 に記す。 n 値は、 $I - V$ 特性（図7. 1、図7. 5）を両対数プロットして求めた。素線の n 値は、 2.5 ~ 3.5 と比較的良好であるのに対して、導体の n 値は、 1.0 ~ 1.5 であり素線と比較して悪い結果を示した。

尚、素線の I_c 定義を $1 \mu V/cm$ としたときの値から算出した劣化率を参考値として表7. 7、表7. 8、図7. 6、図7. 7 に示した。

7. 2 常電導伝搬速度

7. 2. 1 はじめに

本項では Nb₃A1 導体の常電導伝播速度について言及する。試験では誘導ヒータ加熱による安定性試験を実施していないため、臨界電流測定においてクエンチした場合のタップ間電圧波形より常電導伝搬速度を算出した。導体の冷却条件は液体ヘリウム浸漬式で、超臨界ヘリウムは導体内に流していない。

7. 2. 2 測定装置及び解析対象データ

試験導体が常電導転移して発生する電圧波形及び通電電流はデジタル・メモリーで計測した。測定条件は 5ms/word、計 40960 word で、アンプで 100 倍増幅した電圧 ($\pm 5V$) を記録した。

図7. 8 に電圧タップの配置図及びタップ位置における磁場分布を示す。電圧タップは導体の長手方向の中央を中心として左右対称に配置されており、計 10ヶ所である。印加磁場はタップ No. 6-7 の中央部で最も高く、左右にずれるに従って磁場は急激に減少し、タップ No. 3-4, 9-10 ではほぼゼロとなる。

常電導伝搬速度の算出に用いた試験データは次の 3 種である。試験では計 6 回のクエンチ現象が測定されたが、測定磁場とクエンチ電流が同等なもの (#2-7-1, #2-9-1) 及びアンプの設置レンジが不適切 ($\pm 1V$) でオーバー・スケールしたもの (#1

-11-1)は省略した。

RUN#	磁場(T)	I _{max} (kA)
2-8-1	11.2	45.8
2-6-1	11.6	40.2
1-12-1	12.0	39.2

7. 2. 3 常電導伝搬速度の算出法

本試験における常電導伝搬速度の算出には次の二方式を用いた。

1)電圧発生の時間遅れを用いる方法。

図7. 9はデジタル・メモリーで記録した導体の典型的な電圧波形(#2-8-1)を示す。電圧が急激に増加している領域が常電導領域の伝搬を示す。伝搬速度はタップ間距離を電圧の立ち上がりの時間遅れ(T_1 あるいは T_2)で除することで求めた。

2)常電導部長さの時間変化を求める方法。

常電導長さ(X)を次式で算出した。本式は電圧タップ間の電圧が常電導部でのみ発生し、その長さは安定化銅の電気抵抗と通電電流値から求められることによっている。

$$X = R \cdot S / \rho \\ = V \cdot S / (I \cdot \rho) \quad \text{----- (7.1)}$$

ここで、
 X :常電導部の長さ s :導体内の安定化銅の総断面積
 I :通電電流 ρ :安定化銅の比抵抗
 V :タップ間電圧

ここで常電導長さの算出には次の仮定をおいた。図7. 10はその参考図である。

- ①常電導部は導体断面内において一様に伝搬する。
- ②常電導部では超電導電流が全て安定化銅に分流している。
- ③安定化銅の磁気抵抗効果^{7, 11}は、電圧タップ間の平均磁場で近似する。

常電導部長さの計算は、デジタル・メモリーの測定データ(ward, 電圧)を1点づつ出力し、式(7.1)に代入することで計算した。また常電導長さの時間変化から常電導伝搬速度を算出する方法では常電導長さ - 時間の関係図の勾配からその速度を求めた。表7. 9は計算に用いた安定化銅の比抵抗を示す。

7. 2. 4 測定結果

1) 伝搬速度の計算結果

図7. 10はクエンチ開始からの時間経過と各電圧タップ間における常電導長さの関係を示す。クエンチは全て外部磁場の最も高いタップV6-7で生じた。クエンチ発生後、タップ6-7に隣接するタップ5-6, 7-8の領域へ常電導が伝搬している。またタップ5-6, 7-8の常電導長さの増加率が低下し、このタップ間がフルノーマルに達し始めた時間にタップ5-6, 7-8に隣接するタップ4-5, 8-9の常電導長さが増加し始めている。なお、クエンチ発生場所から導体長手方向に対称の位置にある、タップ7-8と5-6及びタップ4-5と8-9の常電導長さの時間変化は同様であり、常電導伝搬はクエンチ発生起点を中心に導体の両長手方向にほぼ同じ速度で伝搬していることがわかる。

ここでタップ5と6及び7と8の距離は90mm、4と5及び8と9は110mm(図7. 10参照)であるのに対し、図7. 11におけるフルノーマル長さは各々約100mm, 120mmとなった。これは常電導長さの算出に用いた安定化銅の磁気抵抗効果を電圧タップ間の中央部で近似してもほぼ妥当な値が得られることを示している。

表7. 10は電圧変化の時間遅れ及び、常電導長さの時間変化の二方法で求めた常電導伝搬速度の一覧を示す。両法を比較すると、V5-6及びV7-8はほぼ同一の結果が得られたが、V4-5及びV8-9では電圧変化の時間遅れから算出した伝搬速度の方がやや高くなっている。また常電導発生点から左右対称の位置にある電圧タップ間においては両法ともほぼ同一の伝搬速度が得られている。

2) 伝搬速度に及ぼす諸条件の影響

図7. 12は常電導伝搬速度(#2-6-1)と電圧タップ位置の関係を示す。伝搬速度はクエンチ発生点から離れるにつれて遅くなる傾向が認められる。これは導体試料中央から離れるほど外部磁場が低く導体の臨界電流特性が高くなると共に安定化銅の比抵抗が低くなり、超電導に対する安定性が高くなったことによるものと考えられる。

図7. 13は常電導伝搬速度に及ぼす通電電流値の影響を示す。解析対象データが3ヶで通電電流値の範囲が40~45kAと狭いためその傾向を把握することは困難であるが、本範囲では大きな変化は認められなかった。

7. 2. 5 まとめ

1) 常電導伝搬速度は電圧タップ5-6, 7-8($B=8\sim 12T$)の位置で約3.5m/s、タップ4-4, 8-9($B=4\sim 8T$)の位置で約2~3m/sであった。また速度分布はクエンチ発生点を起点として左右長手方向に対象であった。

2) 伝搬速度はクエンチ起点から離れるほど低下する傾向にあったが、これは外部磁場が導体の安定性に影響したためと考えられる。なお通電電流依存性については35~40kAの範囲で明確な差異が見い出せなかった。

表7.1 Nb₃Al直状導体Ic、Iq特性 (V6-V7タップ間)

B ext(T)	B self(T)	dI/dt(kA/min)	Ic(kA)	Iq(kA)	n	Run#
11.2	0.716	0.5	-	45.8	-	2- 7-1
	0.700	0.5	-	44.8	-	2- 8-1
	0.680	1.0	-	43.6	-	2- 9-1
11.6	0.660	0.5	-	42.2	-	2- 6-1
12.0	0.484	1.0	-	31.0	-	1-11-1
	0.612	0.5	39.2	-	18	1-12-1
12.5	0.530	0.5	34.0	-	16	2-10-1

(注) Bext:外部磁界, Bself:自己磁界 n: n 値

Ic 定義: $1 \times 10^{-13} \Omega m$ 表7.2 Nb₃Al直状導体Ic、Iq特性 (V5-V8タップ間)

B ext(T)	B self(T)	dI/dt(kA/min)	Ic(kA)	Iq(kA)	n	Run#
11.2	0.716	0.5	-	45.8	-	2- 7-1
	0.703	0.5	-	45.0	-	2- 8-1
	0.684	1.0	-	43.8	-	2- 9-1
11.6	0.666	0.5	-	42.6	-	2- 6-1
12.0	0.480	1.0	-	30.8	-	1-11-1
	0.614	0.5	39.3	-	14	1-12-1
12.5	0.536	0.5	34.3	-	9	2-10-1

(注) Bext:外部磁界, Bself:自己磁界 n: n 値

Ic 定義: $1 \times 10^{-13} \Omega m$

表7.3 Nb₃Al素線Ic測定結果（導体と同時熱処理）

Ic定義	$1 \times 10^{-13} \Omega \text{m}$		$1 \mu\text{V}/\text{cm}$		n値
外部磁界 (T)	素線Ic (A)	素線Jc (A/mm ²)	素線Ic (A)	素線Jc (A/mm ²)	
8.0	343	1259	346	1270	29
10.0	203	745	208	764	21
11.2	146.5	537	151	554	33
11.6	132	485	137	504	—
12.0	114	418	119	437	25
12.5	93	341	98	360	—

表7.4 Nb₃Al直状導体Ic劣化（外部磁界のみ）

外部磁界 (T)	素線Ic × 素線数 (kA)	導体Ic, Iq (kA)	劣化率 (%)
8.0	138.9	—	—
10.0	82.2	—	—
11.2	59.3	45.8	22.7
11.6	53.5	42.2	21.1
12.0	46.2	39.2	15.2
12.5	37.7	34.0	9.8

(注) 素線、導体Ic定義: $1 \times 10^{-13} \Omega \text{m}$

表7.5 Nb₃Al直状導体Ic劣化（自己磁界補正）

外部磁界 (T)	自己磁界 (T)	素線 Ic × 素線数 (k A)	導体 Ic, Iq (k A)	劣化率 (%)
11.2	0.72	47.5	45.8	3.6
11.6	0.66	42.5	42.2	0
12.0	0.62	35.5	39.2	0
12.5	0.44	29.0	34.0	0

(注) 素線、導体 Ic 定義: $1 \times 10^{-13} \Omega m$

自己磁界の向きは、外部磁界と同方向として、劣下率を求めた。

表7.6 各種導体Ic劣化の比較

	撚線構成	撚線ピッチ(mm)	ホット率	Ic劣化率
本サンプル	3×3×3×3×5	100-160-200-300-400	35%	0%
原トロT	3×3×3×6	107-205-320-900	41%	40-65%
原トロF	3×3×3×3×4	315-414-414-449-618	38%	10-16%
US-DPC	3×3×3×5	51-102-203-305	38%	0%

(参考) 素線 Ic の定義を $1 \mu V/cm$ とした時の Jc から求めた導体の劣化率。本サンプル以外は、Nb₃Sn導体である。

表7.7 Nb₃Al直状導体Ic劣化

外部磁界 (T)	素線 Ic × 素線数 (kA)	導体 Ic, Iq (kA)	劣化率 (%)
8.0	140.1	—	—
10.0	84.3	—	—
11.2	61.1	45.8	25.0
11.6	55.6	42.2	24.1
12.0	48.2	39.2	18.7
12.5	39.7	34.0	14.4

(注) 素線 Ic 定義: $1 \mu V/cm$ 、導体 Ic 定義: $1 \times 10^{-13} \Omega m$

表7.8 Nb₃Al直状導体Ic劣化(自己磁界補正)

外部磁界 (T)	自己磁界 (T)	素線 Ic × 素線数 (kA)	導体 Ic, Iq (kA)	劣化率 (%)
11.2	0.72	51.0	45.8	10.1
11.6	0.66	45.0	42.2	6.2
12.0	0.62	39.0	39.2	0
12.5	0.44	32.5	34.0	0

(注) Ic 定義: $1 \mu V/cm$ 、導体 Ic 定義: $1 \times 10^{-13} \Omega m$

自己磁界の向きは、外部磁界と同方向として、劣化率を求めた。

表7.9 常電導長さの算出に用いた安定化銅の比抵抗 (単位 $10^{-10} \Omega\text{m}$)

電圧タップ位置		
RUN#	V5-6, V4-5	V7-8, V8-9
2-8-1	4.9 at 9.2T	3.5 at 5.7T
2-6-1	5.0 at 9.4T	3.5 at 5.7T
1-12-1	5.1 at 9.8T	3.8 at 6.0T

表7.10 常電導伝搬速度の計算結果 (単位 : m/s)

RUN#	電圧変化の時間遅れによる方法				常電導長さの時間変化による方法			
	V5-6	V7-8	V4-5	V8-9	V5-6	V7-8	V4-5	V8-9
2-8-1	3.6	4.5	2.4	2.2	3.6	3.5	1.8	1.8
2-6-1	3.6	3.6	2.7	2.7	3.3	3.6	1.9	1.9
1-12-	3.8	-	2.7	-	3.3	-	1.8	-

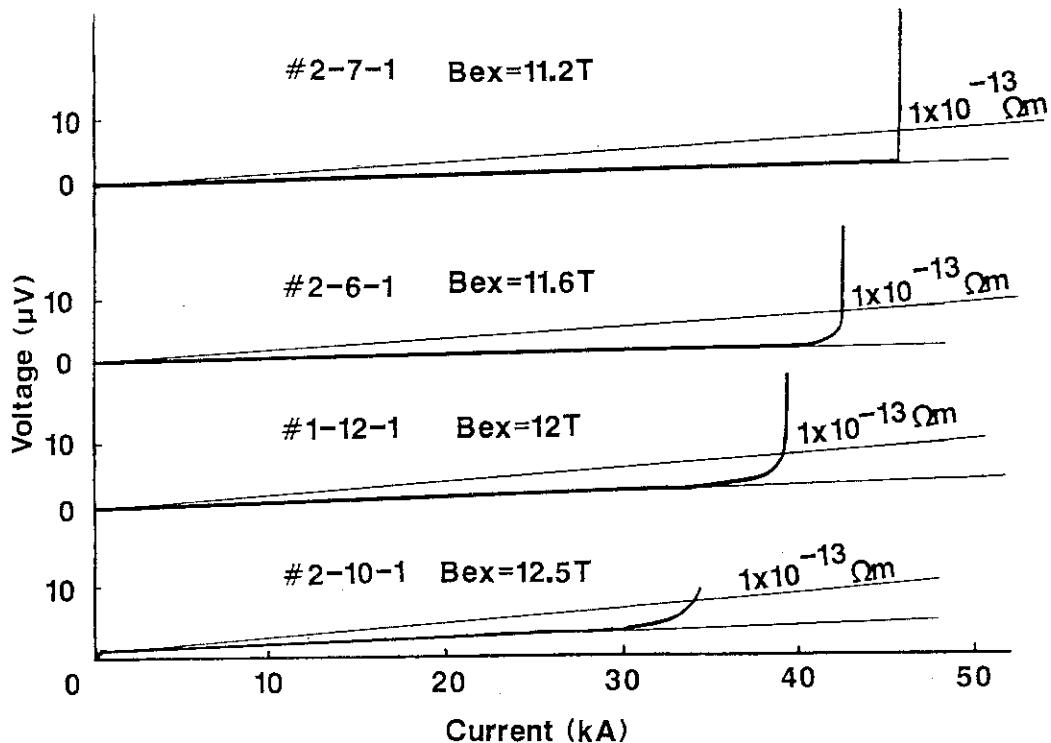
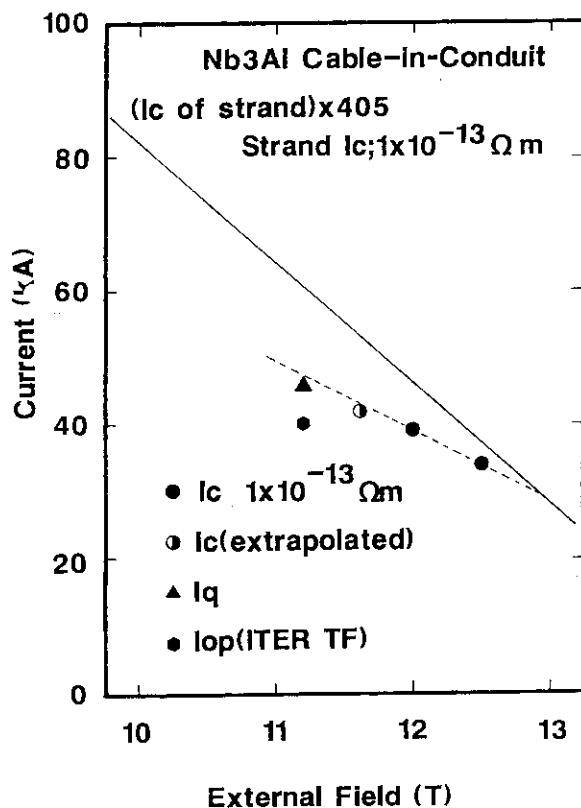
図7.1 40kA級Nb₃Al導体の電流-電圧特性

図7.2 40kA級Nb₃Al導体と素線の臨界電流値と外部磁界の関係
(素線のI_c基準: $1 \times 10^{-13} \Omega \cdot m$ 、サンプルの自己磁界
を考慮しない場合)

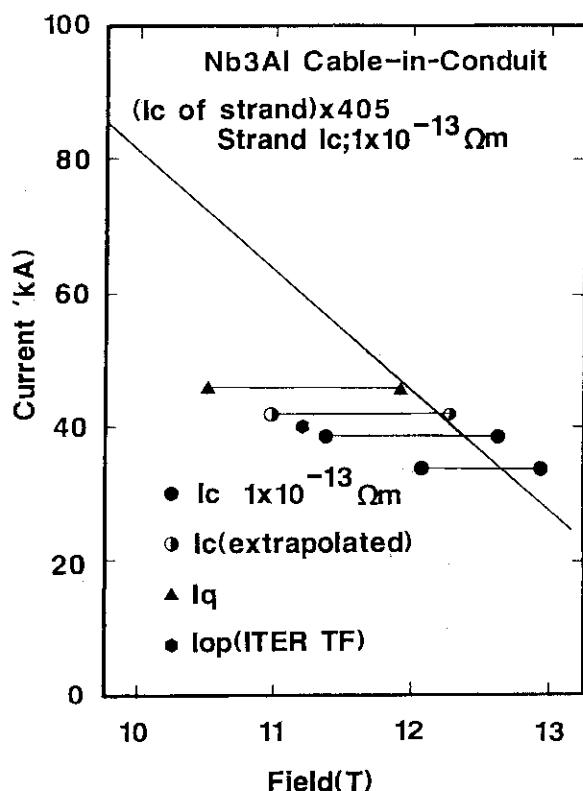


図7.3 40kA級Nb₃Al導体と素線の臨界電流値と外部磁界の関係
(素線のI_c基準: $1 \times 10^{-13} \Omega\text{-m}$ 、サンプルの自己磁界
を考慮した場合)

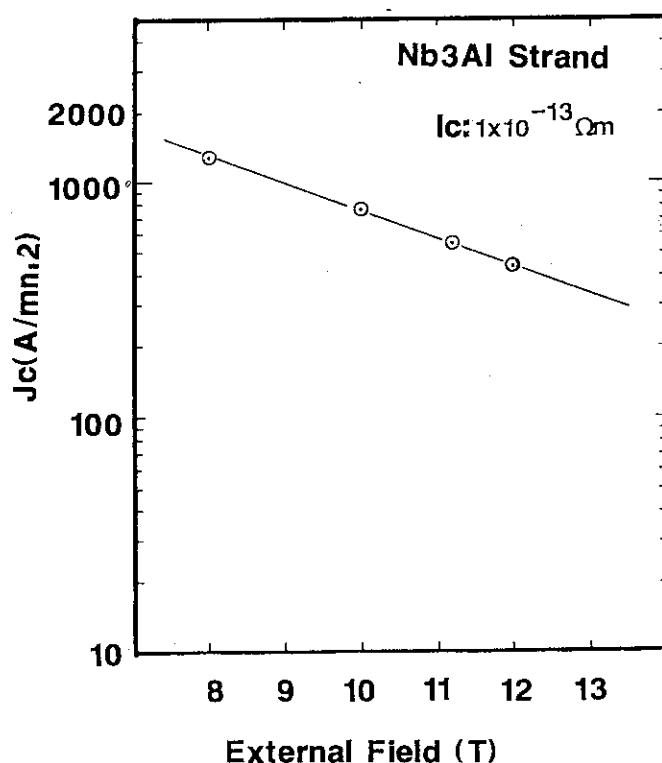


図7.4 Nb₃Al素線の臨界電流密度(J_c)と外部磁界の関係

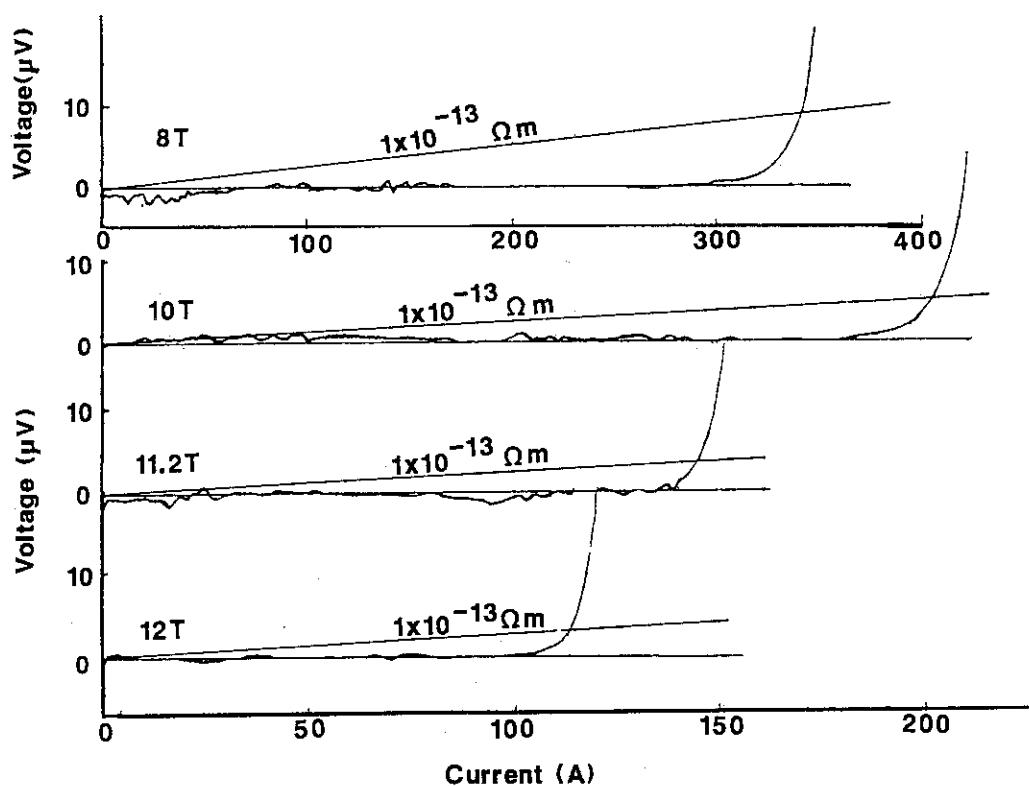
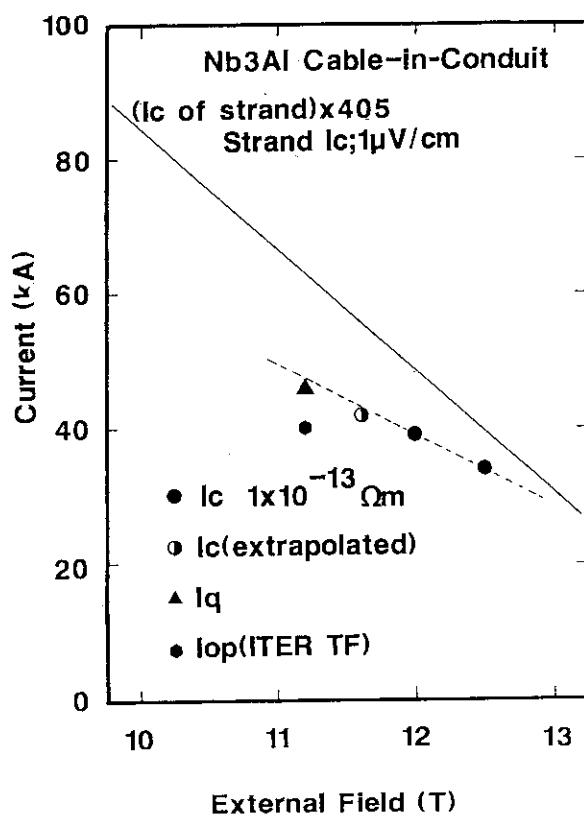
図7.5 Nb₃Al素線の電流-電圧特性

図7.6 40kA級Nb₃Al導体と素線の臨界電流値と外部磁界の関係
(素線のIc基準: $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、サンプルの自己磁界を考慮しない場合)

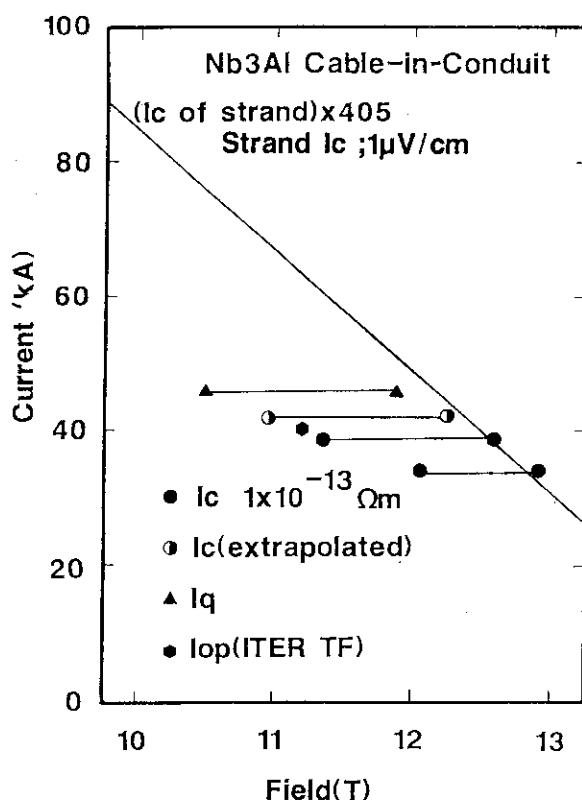


図7.7 40kA級Nb₃Al導体と素線の臨界電流値と外部磁界の関係
(素線のIc基準: 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 、サンプルの自己磁界を考慮
した場合)

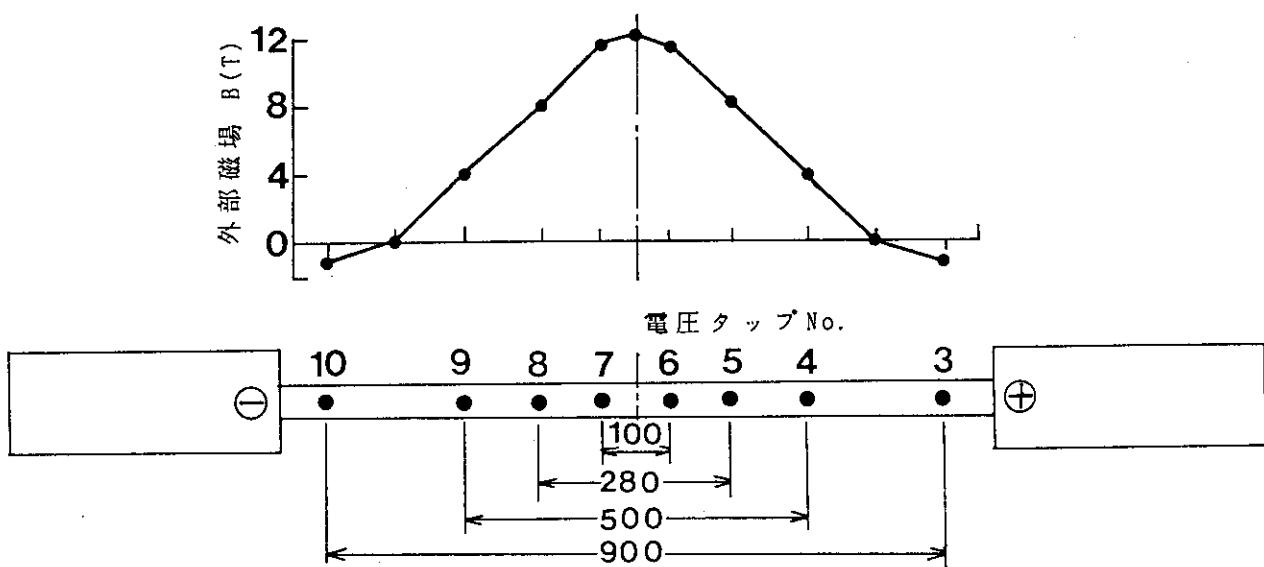


図7.8 サンプルにおける電圧タップの配置と外部磁界の分布

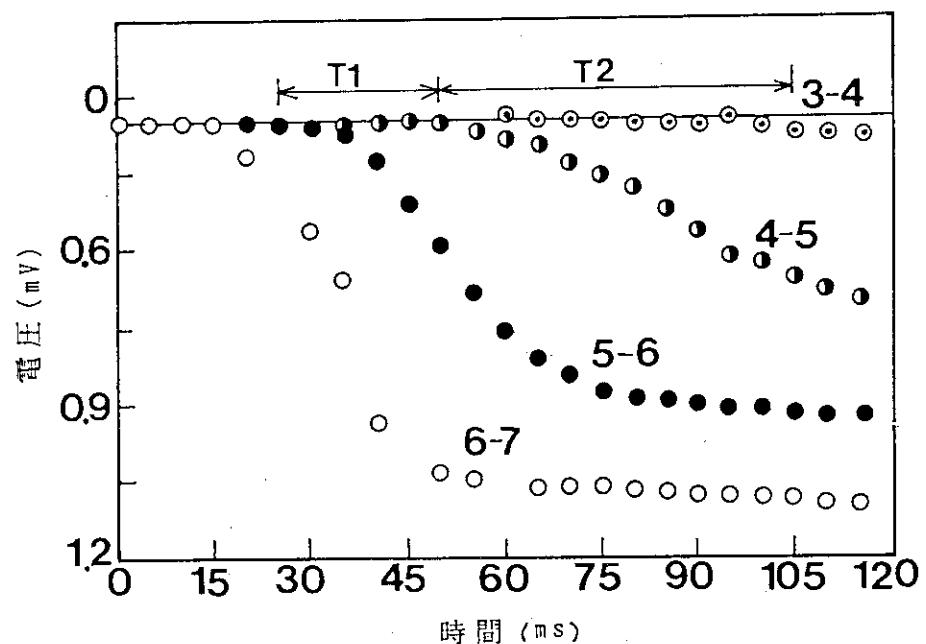


図7.9 クエンチ時のサンプル電圧波形 (RUN#2-8-1)

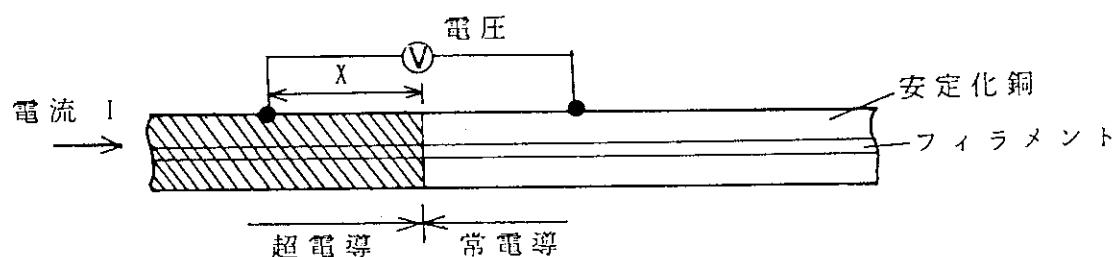


図7.10 超電導導体における常電導長さの算出方法の説明

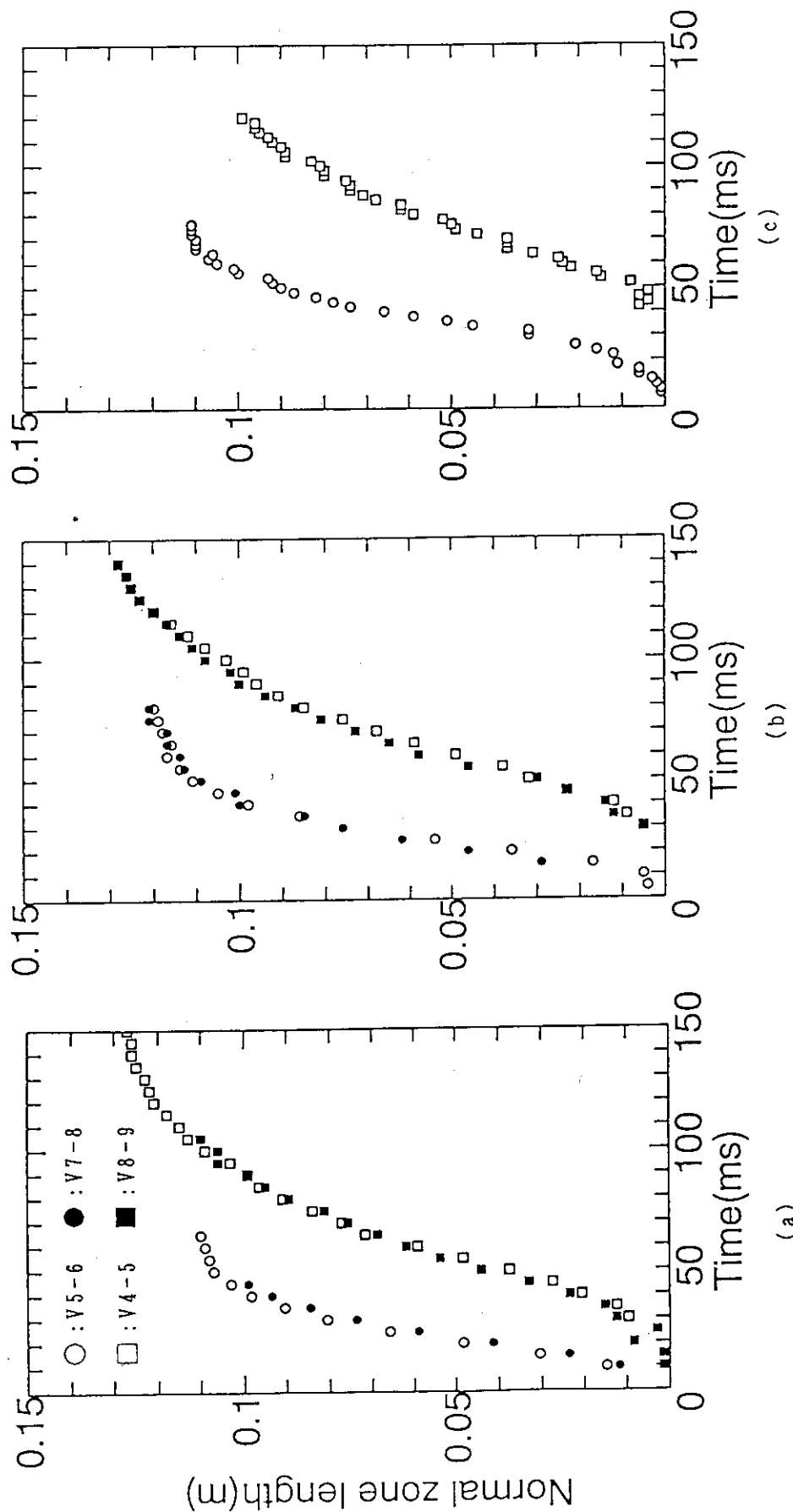


図7.11 クエンチ発生後の常電導長さの時間経過
(a) #2-6-1; 11.6T, 40.2kA (b) #2-8-1; 11.2T, 45.8kA (c) #1-12-1; 12.0T, 39.2kA

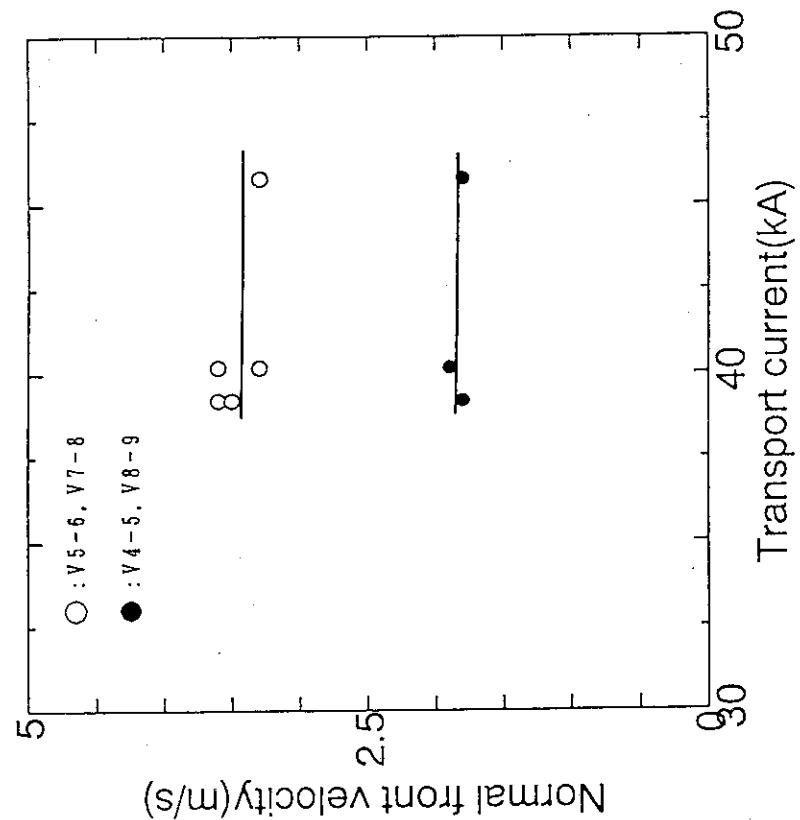


図7.13 常電導伝搬速度と通電電流値の関係

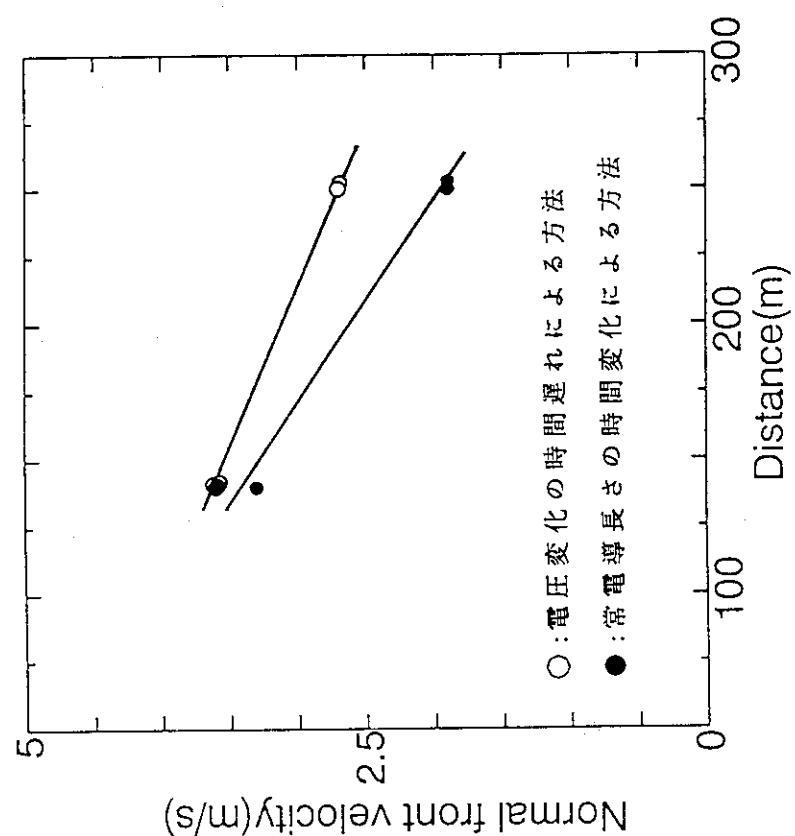
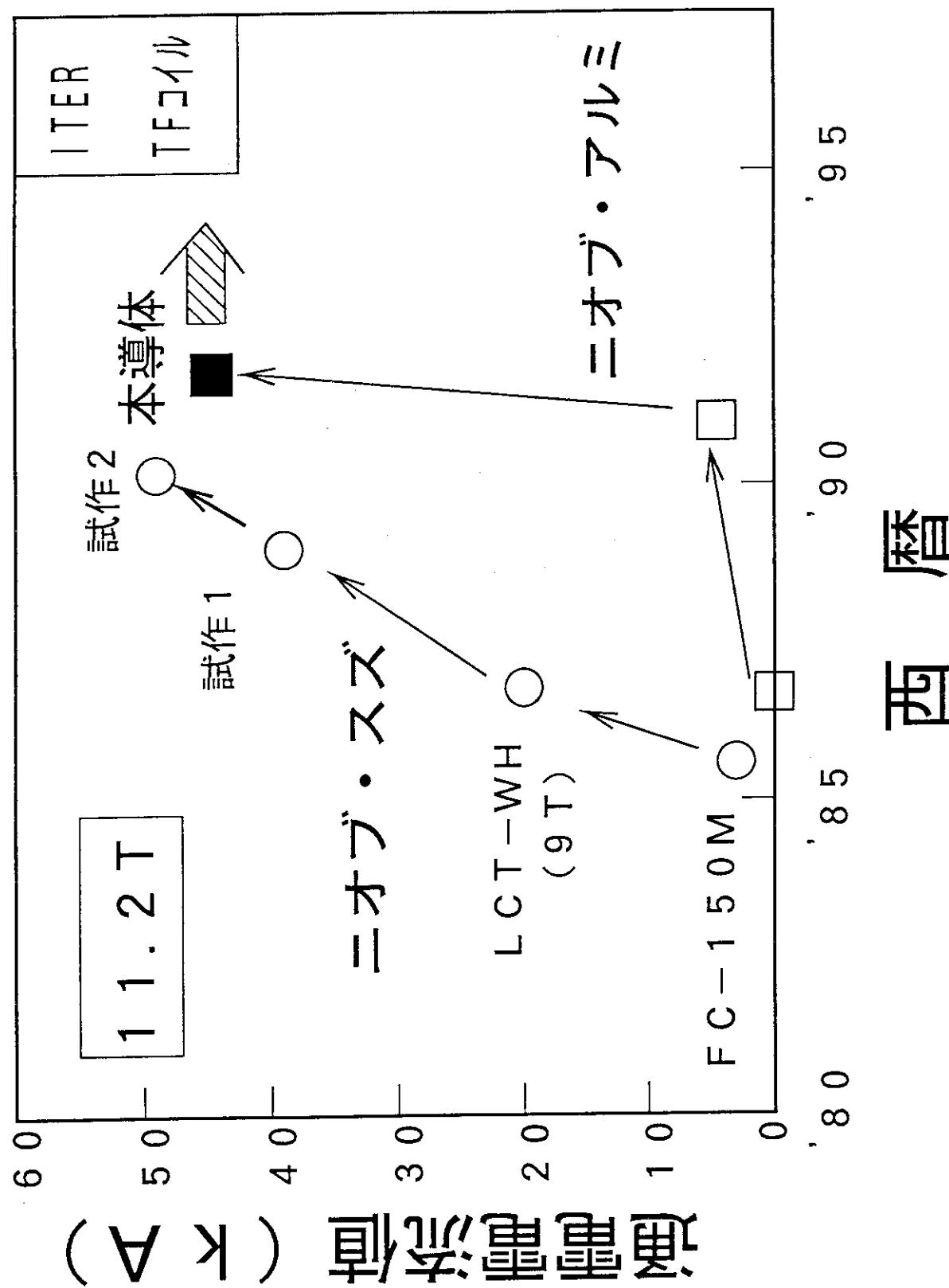


図7.12 常電導伝搬速度と電圧タップ位置の関係 (RUN#2-6-1)

8. まとめ

1. 40 kA級大型導体の実験において、サンプル組立から実験まで、約20名のチーム・ワークにより、予定どおり安全に行うことができた。
2. Nb₃A₁が、Nb₃S_nより機械的に優れた特性を有することが実験により示された。
3. 開発された導体において、ITERの仕様である磁場11.2Tにおいて運転電流値40kAを上回る46kAまで通電することができた。
4. これまで、製作方法が困難であったNb₃A₁導体の実用化に、世界で初めて成功した。
5. 本導体は、原研において開発されたNb₃S_n導体と同等のレベルに達したと言いうことができる。（図8.1参照）
6. Nb₃A₁は、潜在的にはさらに優れた性能を有するので、さらに改良を加えることにより、ITERのTFコイル用導体の第一候補となることが、期待される。

図8.1 大電流Nb₃Al及びNb₃Sn導体の開発状況

謝　　辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた島本進核融合工学部・部長、及び有用な議論をして下さった超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表す。

また、サンプルの製作を担当された住友電工（株）に感謝の意を表す。

参　考　文　献

- 1.1) D. Zeritis, et al., "Transverse stress effect on the critical current of jell-roll multifilamentary Nb₃Al wire", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, pp. 506-507, 1990.
- 1.2) T. Ando, et al., "DEVELOPMENT OF Nb₃Al CABLE-IN-CONDUIT FUSION SUPERCONDUCTORS", Proceeding of 1992 Applied Superconductivity Conference, Chicago, 1992.
- 3.1) T. Isono, et al., "Critical Current Measurements Using 13-T Split Coils and Superconducting Transformer", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, pp. 1839-1842, 1991.
- 7.1) T. Ando, et al., "Development of 10kA Class Nb₃Al Superconducting cable by Jelly-Roll Process", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, pp. 1775-1778, 1991.

謝　　辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた島本進核融合工学部・部長、及び有用な議論をして下さった超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表す。

また、サンプルの製作を担当された住友電工（株）に感謝の意を表す。

参　考　文　献

- 1.1) D. Zeritis, et al., "Transverse stress effect on the critical current of jell-roll multifilamentary Nb₃Al wire", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, pp. 506-507, 1990.
- 1.2) T. Ando, et al., "DEVELOPMENT OF Nb₃Al CABLE-IN-CONDUIT FUSION SUPERCONDUCTORS", Proceeding of 1992 Applied Superconductivity Conference, Chicago, 1992.
- 3.1) T. Isono, et al., "Critical Current Measurements Using 13-T Split Coils and Superconducting Transformer", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, pp. 1839-1842, 1991.
- 7.1) T. Ando, et al., "Development of 10kA Class Nb₃Al Superconducting cable by Jelly-Roll Process", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 27, pp. 1775-1778, 1991.