

JAERI-M

8784

応力下試験装置によるLCTコイルのための  
実証試験(1)

1980年3月

吉田 清・多田 栄介・小泉 興一・松山 忠雄

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

応力下試験装置によるLCTコイルのための実証試験 (I)

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

吉田 清・多田 栄介・小泉 興一・

桧山 忠雄

(1980年2月13日受理)

応力下試験装置完成後の約1年間に行った、日本のLCTコイルに関する実証について報告する。本報告は、装置の諸量、LCT導体の引張試験、大電流超電導用安定化銅の試験、超電導々体におけるハンダの特性およびストレイン・ゲージの特性について述べている。これらの作業は、LCTコイルの詳細設計に反映され、設計作業を大きく進展させる結果を生んでいる。付録に $Nb_3Sn$ 導体の引張試験について述べ、この試験結果は実際の $Nb_3Sn$ マグネットの製作に重要なデータを提供した。

Mechanical Verification Tests for the Japanese LCT Coil (I)

Kiyoshi YOSHIDA, Eisuke TADA, Koichi KOIZUMI  
and Tadao HIYAMA

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research  
Establishment, JAERI

( Received February 13, 1980 )

This report describes mechanical the verification test procedure for the Japanese LCT coil and the test results.

Tests performed are :

- (1) tensile test of full-size Japanese LCT conductor,
- (2) tensile test and micro vickers hardness test of copper stabilizer of cold reduction,
- (3) mechanical characteristic test of composite conductor consisting of copper stabilizer, strand cable and solder,
- (4) strain gauges characteristic test at liquid helium temperature in high magnetic field.

The 10-ton cryogenic tensile test apparatus and a tensile test of  $Nb_3Sn$  conductor are also described.

Keywords : Superconductor, Copper Stabilizer, Strain Gauge  
Composite Conductor, Stress, Large Coil Task,  
Tensile Test Facility, Coils

## 目 次

1. はじめに.....	1
2. 応力下超電導特性試験装置の概要.....	2
3. L C T 導体の引張試験.....	9
4. 硬質電気銅の機械及び電気特性.....	12
5. 超電導々体における超電導線とハンダの特性.....	15
6. L C T 1/4 ヘリウム容器面外力試験.....	24
7. 極低温、強磁場中でのストレイン・ゲージの特性.....	33
8. おわりに.....	39
参考文献.....	39
謝辞.....	39
付録 Nb <sub>3</sub> Sn 導体の引張試験.....	40

## CONTENTS

1. Abstract .....	1
2. Apparatus for investigating superconducting property under stress .....	2
3. Tensile test of full size conductor .....	9
4. Mechanical and electroc properties of hard OFHC copper .....	12
5. Mechanical properties of the composite material consisted of superconducting strand cable and solder .....	15
6. Experimental and calculation on ALT #B test condition with 1/4 model .....	24
7. The effect of high magnetic fields and cryogenic temperature on metal foil strain gage .....	33
8. Conclusion .....	39
References .....	39
Acknowledgment .....	39
Appendix .....	40

## Table and Figures

- Table 2.1 Magnetic specification
- Table 2.2 Cooldown procedure of the facility
- Table 3.1 Mechanical characteristics of LCT conductor at 77 K
- Table 4.1 Micro Vickers hardness test result
- Table 5.1 Conditions of test sample
- Table 5.2 Mechanical properties of 1/4 model conductor
- Table 5.3 Young's modulus of LCT conductor
- Table 6.1 Measured and computed displacement at 2,000 Kg loading
- 
- Fig. 2.1 Apparatus view
- Fig. 2.2 Apparatus over view
- Fig. 2.3 Cryostat and its structure
- Fig. 2.4 Magnet and cryostat structure
- Fig. 2.5 Chack mechanic ditails
- Fig. 2.6 Sample and Sample grip
- Fig. 2.7 Upper side view of S.C. magnet
- Fig. 3.1 Strain gauges seting point
- Fig. 3.2 Load-strain diagram (1)
- Fig. 3.3 Load-strain diagram (2)
- Fig. 4.1 Mechanical characteristics of OFHC copper depending on cold reduction
- Fig. 4.2 Dependency of hard OFHC copper resistivity on magnetic field
- 
- Fig. 5.1 LCT conductor cross-section
- Fig. 5.2 1/4 model conductor cross-section
- Fig. 5.3 1/4 model test piece
- Fig. 5.4 Load-plastic strain curves of 1/4 model conductor
- Fig. 5.5 Load-elastic strain curves of 1/4 model conductor
- Fig. 5.6 Load-elastic strain diagram of full size conductor
- Fig. 6.1 The ditail drowing of the 1/4 model of helium vessel
- Fig. 6.2 A picture of the 1/4 model
- Fig. 6.3 The setting of the 1/4 model
- Fig. 6.4 A picture of the model during the measurement
- Fig. 6.5 Position of the strain gauges and the dial ganges
- Fig. 6.6 The computer calculation model

- Fig. 6.7 Comparison of calculated principal stresses with experimental values
- Fig. 7.1 Test piece for gage factor calibration of strain gauge
- Fig. 7.2 A picture of the test piece
- Fig. 7.3 Gage factor as a function of temperature
- Fig. 7.4 The constant temperature sample holder
- Fig. 7.5 Over view of the constant temperature sample holder
- Fig. 7.6 Thermal virtual strain
- Fig. 7.7 Magnetic virtual strain
- Fig. A.1  $Nb_3Sn$  superconductor
- Fig. A.2 The sample of  $Nb_3Sn$  conductor
- Fig. A.3 A picture of the sample
- Fig. A.4 Critical current as a function of strain



## 1. はじめに

日本のLCTコイル<sup>D)</sup>のための応力および歪の問題についての実証試験結果の一部を報告する。この作業は現在も進行中であり、今後も発展してゆくものである。したがって、本報告は昭和54年度に行なった作業のまとめとしての意味をもつ。

本報告では以下の点について記述する。

- (1) 昭和53年12月から稼動開始した超電導特性試験装置の概要として、装置の説明、測定法及び実際の使用時間及び使用冷媒量について述べる。
- (2) 実寸大のLCT導体について液体窒素温度で引張試験を行なったので材料特性の結果について述べる。
- (3) LCT導体に使用する安定化銅について、加工度をパラメータにした材料特性の結果について述べる。
- (4) LCT導体内部の門型安定化銅と超電導ストランド・ケーブル及びハンダについて行った機械的特性試験結果について述べる。
- (5) LCTコイルの1/4ヘリウム容器に外力を加えて、応力と変位を測定した結果について述べる。この結果と二次元応力解析の結果の比較を示す。
- (6) 極低温、強磁場中でのストレイン・ゲージの特性試験を行なった結果について述べる。
- (7) 付録として、 $Nb_3Sn$  導体の引張試験について述べる。

## 2. 応力下超電導特性試験装置の概要

### 2.1 はじめに

本装置の主な目的は、トカマク型核融合炉のトロイダル・コイルの開発研究するにあたり、使用材料の機械的特性を液体ヘリウム温度（4.2 K）で試験することである。本装置の仕様は最大磁界 5.5 T、試料通電電流 2 KA、及び最大荷重 10 トンである。<sup>(2)</sup>

### 2.2 装置の説明

本装置は 10 トン用引張試験機、クライオスタット、超電導マグネット及びその電源・保護装置、測定系から構成されている。本装置の本体の概要図を Fig. 2.1 に、全体写真を Fig. 2.2 に示す。本試験機の最大引張及び圧縮荷重は 10 トンであり、くり返し試験も可能である。また、最大歪は約 30 % まで加えることができる。さらに、1 トン、及び 100 kg の引張試験ができるロード・セルを有し、試験精度を高めめることが可能である。

クライオスタットは内径 400 mm  $\phi$ 、深さ 1,450 mm で、電流リードはマグネット通電用の 500 A と、試料通電用の 2,000 A の 2 組が付けられるようになっている。この装置の低温引張 治具は Fig. 2.3 及び 2.4 に示してある。又、本装置の開発の中で最も困難であった点はチャック部であり、その形状は最終的に Fig. 2.5 に示す形になった。特に製作上注意した点は、チャック・フェースを上部から十分に締めつけて、試料とチャック・フェースの歯をかませる点と、チャックとチャック・フェースのすべり面を SUS 対 SUS で行なった点である。Fig. 2.6 が試料を取りつけたところの写真である。

超電導磁石は Table 2.1 と Fig. 2.7 に示す形状でスプリット型マグネットである点を特長としている。中心磁界 5.5 T であるが、導体部での最高磁界は 7.3 T である。又、常電導転移する磁界は中心磁界で 6.1 T であり、現在まで安定して動作している。

### 2.3 測定

熱浸入を下げるため幾可学的寸法の制約上、低温治具の剛性が試料とほぼ同程度なため、歪の測定は主にストレイン・ゲージを用いている。しかし、塑性伸びはクロス・ヘッドの動きから求めている。ストレイン・ゲージの実証については 報告の 7. で述べている。また、液体ヘリウム温度での実験作業の信頼性を上げるためにストレイン・ゲージは常に 2 枚以上使用している。測定器には、ストレイン・アンプを用いてシグナル・コンディションした後に、レコーダや計算機等を用いてデータ処理している。

## 2.4 その他

本装置は国内最大の試験容量を持つ極低温引張試験機であるので、その特長を有効に使用した実験を行なうことができた。それらの結果は次章以下に述べられている。さらに、実験の効率の向上及び範囲の拡大のために以下の改造が計画され、55年中に改良を終らせる予定である。

- (1) タレット型10トン引張試験機への改良。
- (2) 引張容量を20トンへ増強。
- (3) 試料通電電流を6KAへ増掲。

さらに、極低温領域での材料試験、及び導体開発は本装置を有効に利用して進めることを考えると磁界を10Tへ増強する改良案も検討されつつある。

Table 2.1 Magnetic specification

style	Horizontal split magnet
size	
inner dia.	140 mm $\phi$
outer dia.	240 mm $\phi$
length	220 mm $l$
clear split space	40 mm $\times$ 600 mm
magnetic field	5.5 T
homogeneity	2% in 50 mm D.S.V
used wire	1 mm $\times$ 2 mm Cu-Nb.Ti
winding method	solenoid
transport current	400 A

Table 2.2 Cooldown procedure of the facility

	PROCESS	TIME (M)	SUPPLIED COOLANT ( $\ell$ )
1	LiN <sub>2</sub> TRANSFER		
	TO DEWAR	60	150
	TO SHIELD	20	40
	TO SUB TANK	5	10
2	LiN <sub>2</sub> PURGE		
	OF DEWAR	30	-
3	LiHe TRANSFER		
	TO DEQAR	60	100
	TOTAL	180	LiN <sub>2</sub> 200 LiHe 100

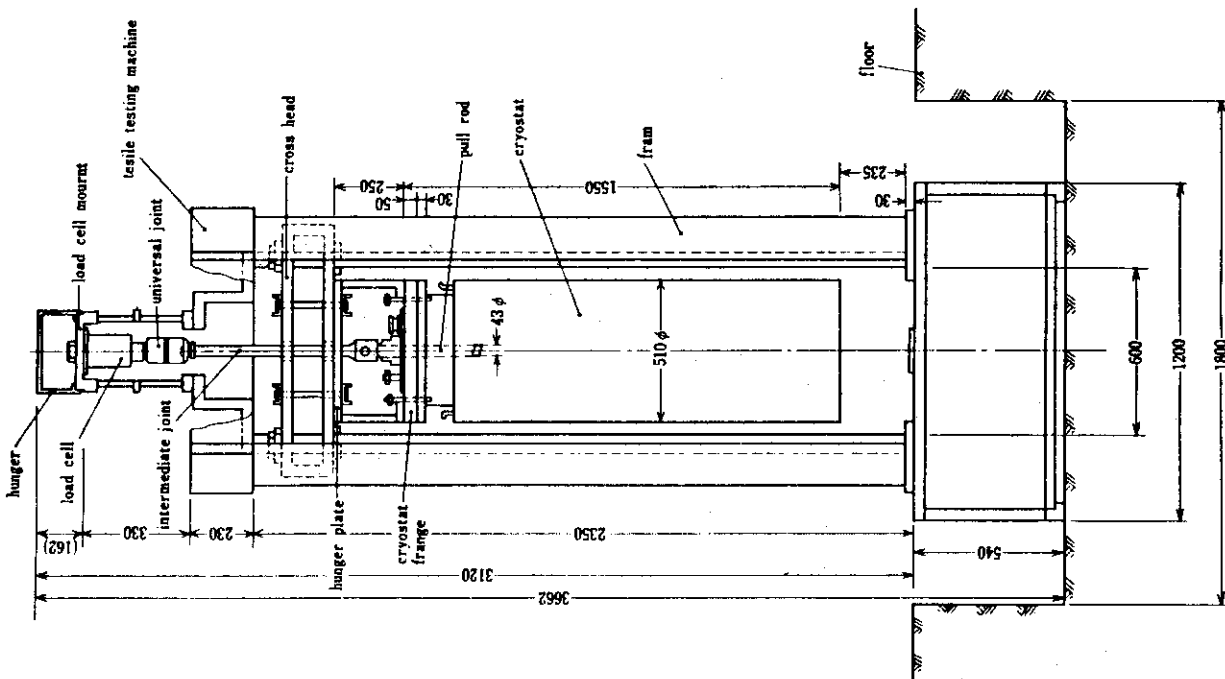


Fig. 2.1 Apparatus view

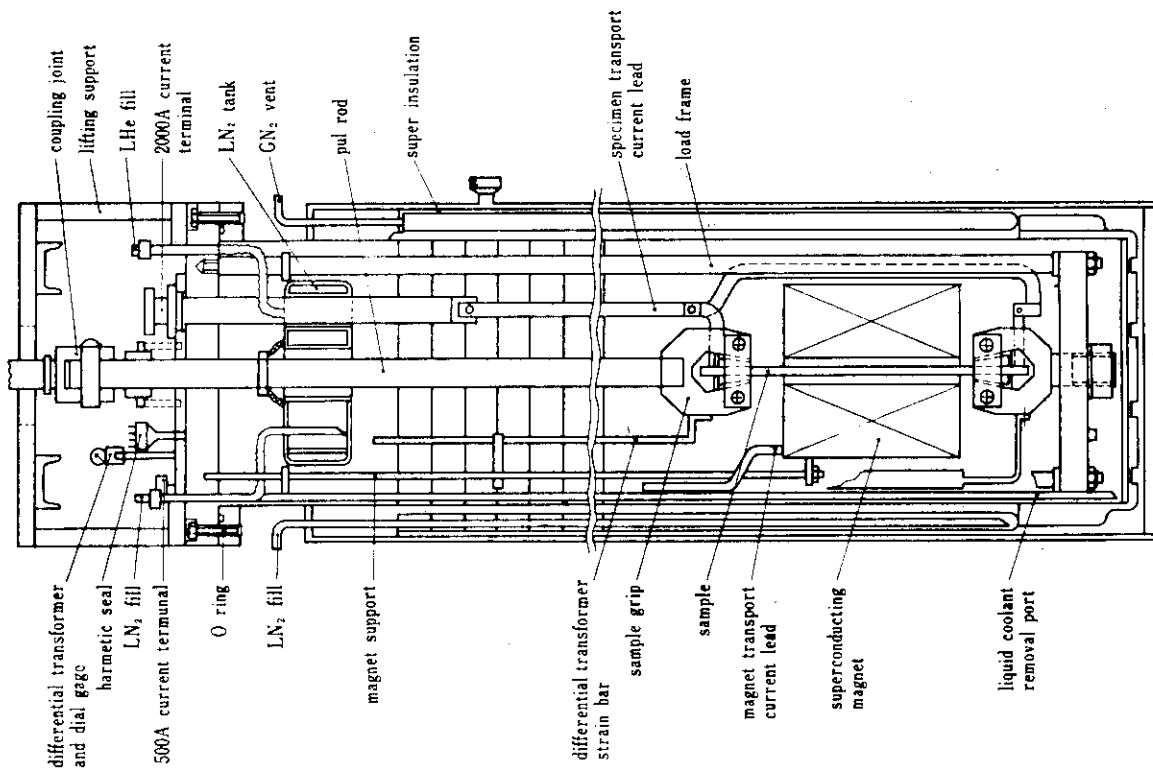


Fig. 2.3 Cryostat and its structure

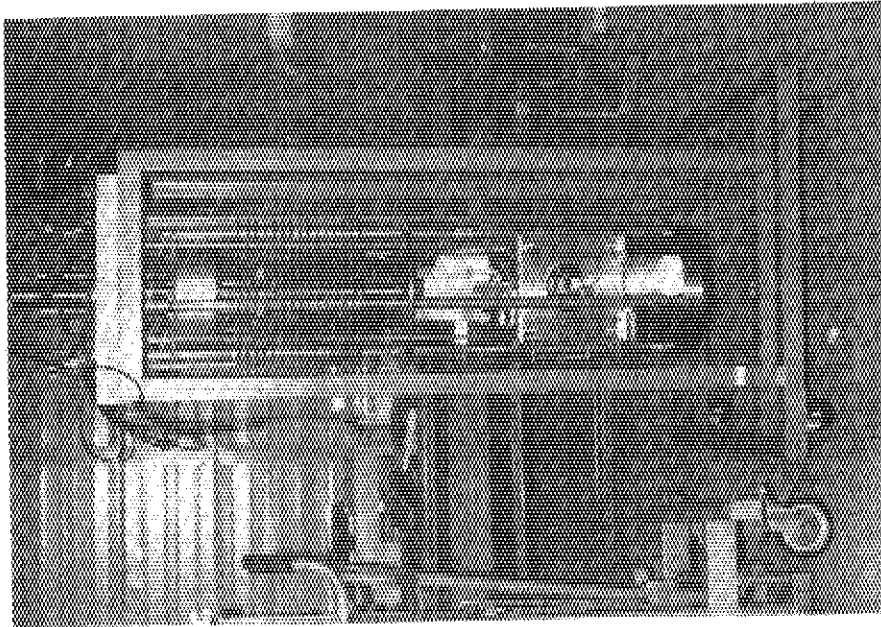


Fig. 2.4 Magnet and cryostat structure

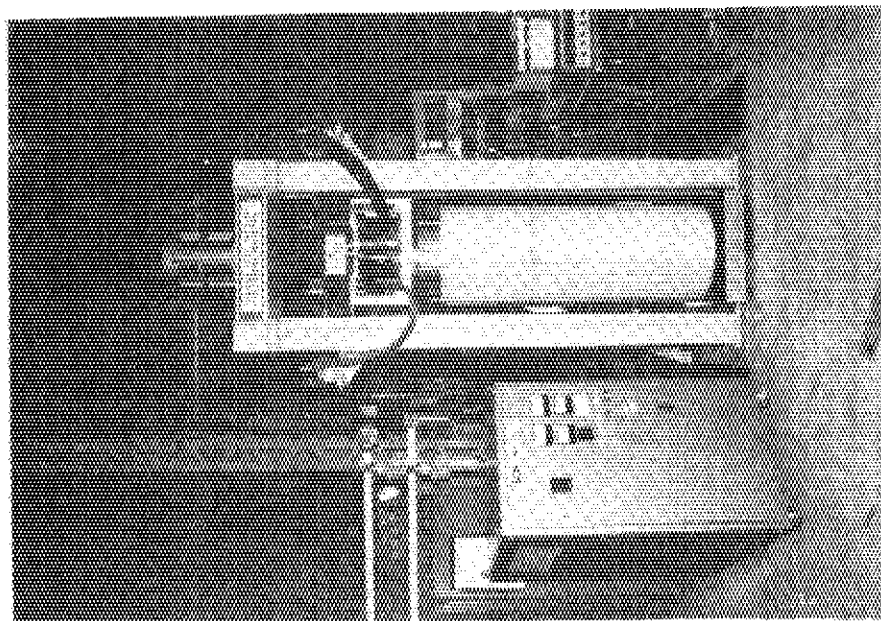


Fig. 2.2 Apparatus over view

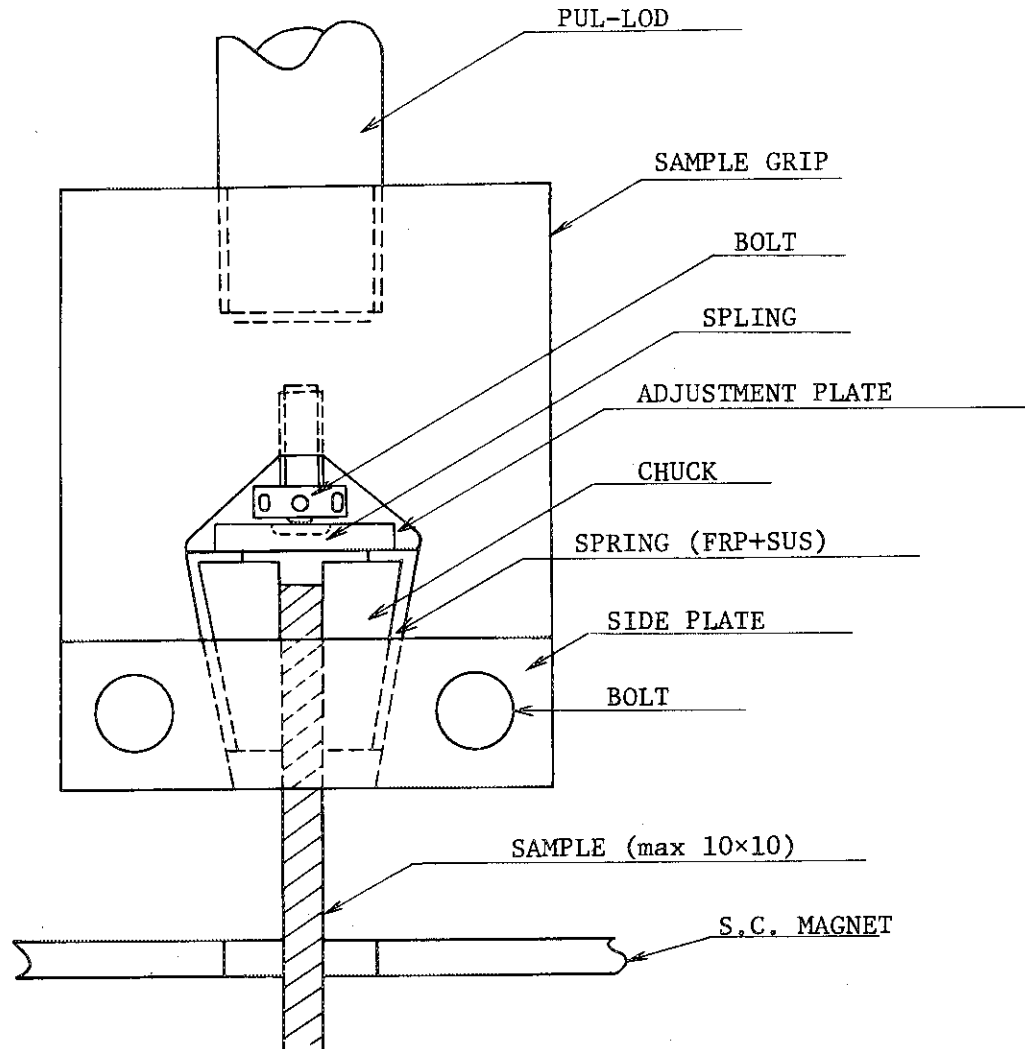


Fig. 2.5 Chuck mechanic details

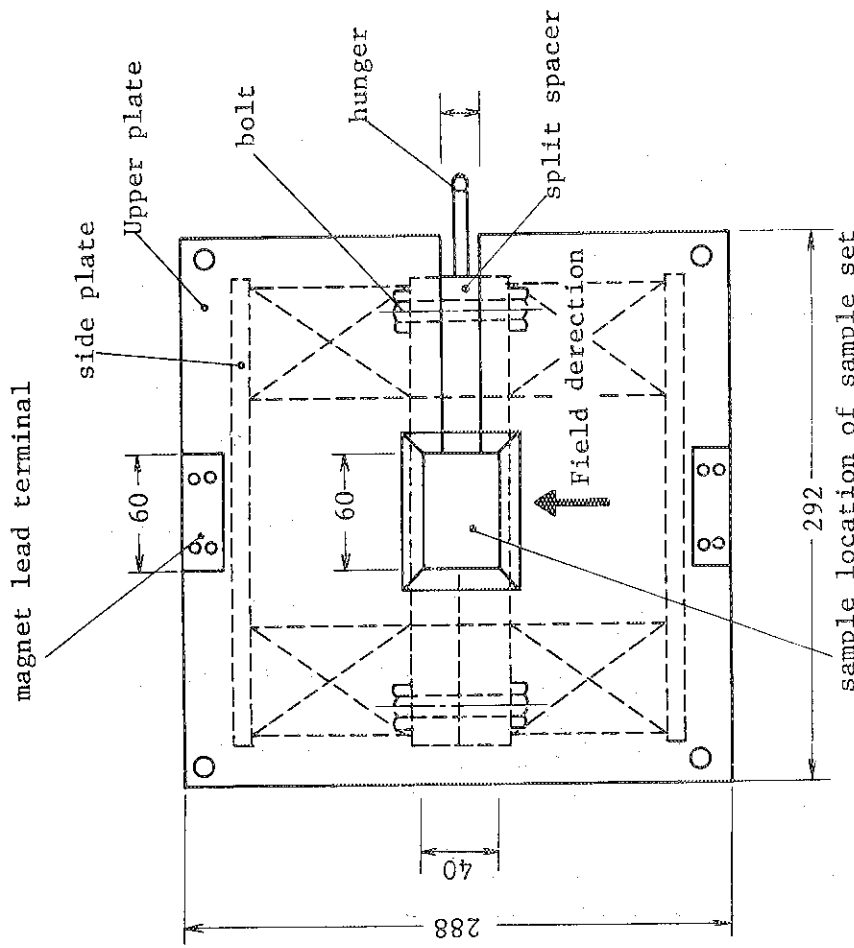


Fig. 2.7 Upper side view of S.C. magnet

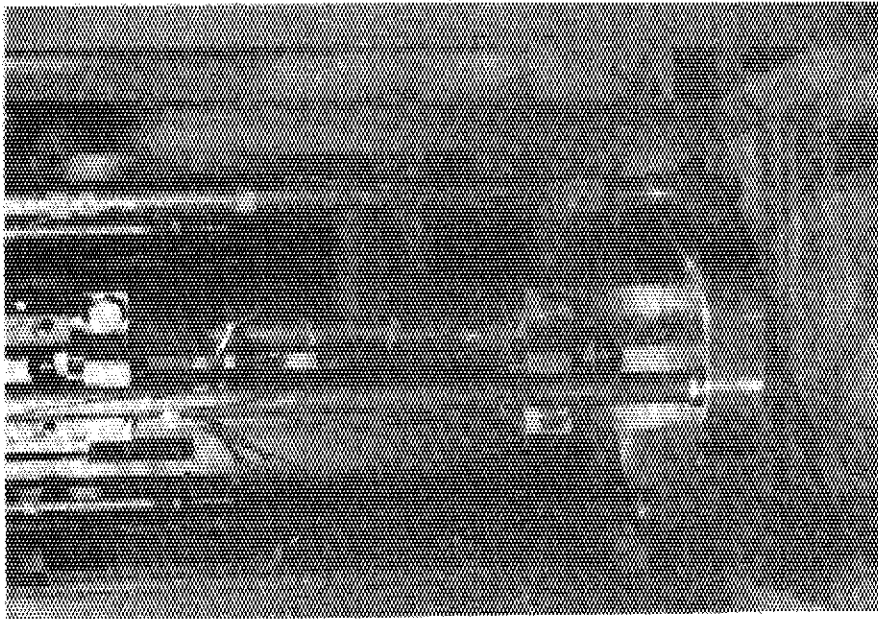


Fig. 2.6 Sample and sample grip



### 3. LCT 導体の引張試験

#### 3.1 はじめに

実際のLCT コイルは液体ヘリウム温度で使用するので、今後液体ヘリウム温度でのLCT 導体の材料定数が必要であるが、その前段階として、液体窒素温度で実験を行なったので報告する。実験によって求めた材料定数は、0.2%耐力、ヤング率、横弾性係数及び断面内の歪の分布状況である。

#### 3.2 実験方法

本実験は液体ヘリウムの使用量を減らすために、2.で述べた応力下超電導特性試験装置のマグネットを取りはずして行なった。試料数は2本で、試料は実寸法のLCT 導体であるが、実機で行なう予定となっている側面の表面機械加工は施されていない。断面寸法は26.8 mm × 12.6 mm で、門型安定化銅の中にストランド・ケーブルがハンダで接着されている。この試料の断面と、これに貼りつけられた5枚のストレイン・ゲージG 1～G 5の位置をFig. 3.1に示す。測定はストレイン・アンプを通してミニ・コンピュータでデータ処理を行なった。

#### 3.3 実験結果

Fig. 3.2とFig. 3.3が歪と荷重の関係を示す実験結果である。図中のG 1からG 5はそれぞれ同一名称のストレイン・ゲージの測定結果であり、見やすくなるよう原点はずらして示している。この測定結果からこの試料のヤング率、ポアソン比、0.2%耐力を求めた数値をTable 3.1に示す。この中でストランド・ケーブルが荷重を分担するかどうかの解明は5.に述べられているが、0.2%耐力を求めるための断面積は門型安定化銅とストランド・ケーブルの断面積を合計した値を用いている。さらに、ヤング率については測定結果が各ストレイン・ゲージ位置での歪が一致しなかったために、大きな誤差を生じた。

Table 3.1 Mechanical characteristics of  
LCT conductor at 77 K

0.2 % PROOF STRESS	$24.4 \pm 0.3 \text{ Kg/mm}^2$
YOUNG'S MODULUS	$(9.75 \pm 0.21) \times 10^3 \text{ Kg/mm}^2$
POISSON'S RATIO	$0.33 \pm 0.02$

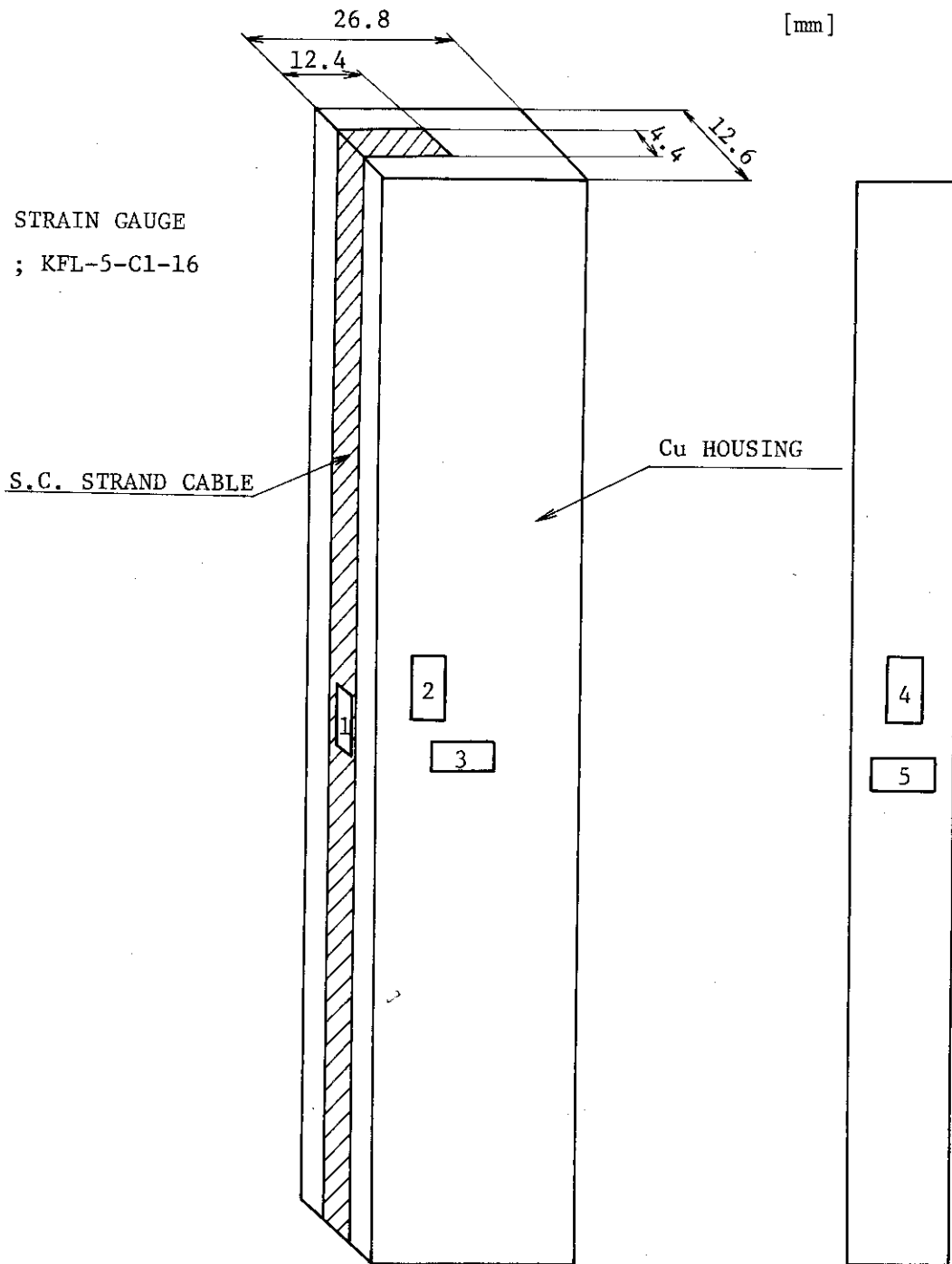


Fig. 3.1 Strain gauges setting point

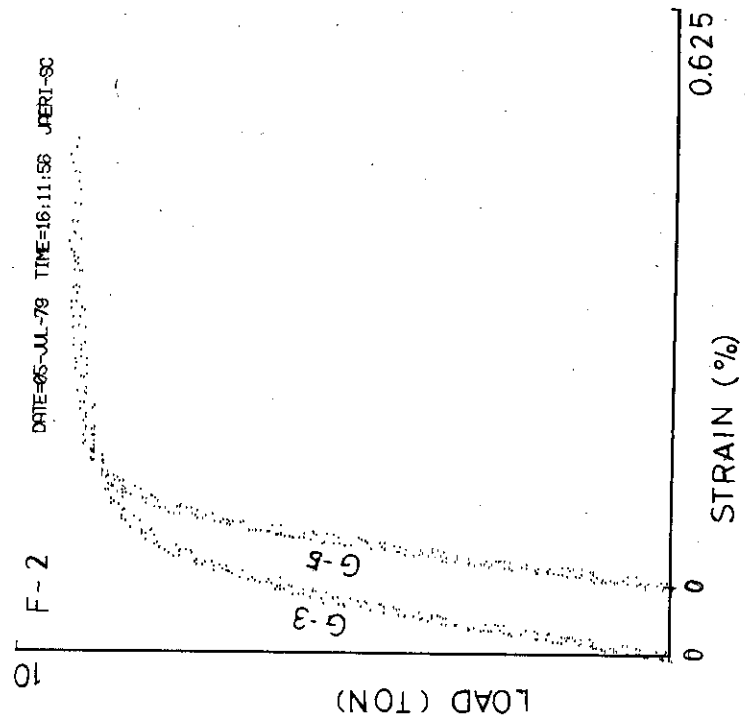


Fig. 3.3 Load-strain diagram (2)

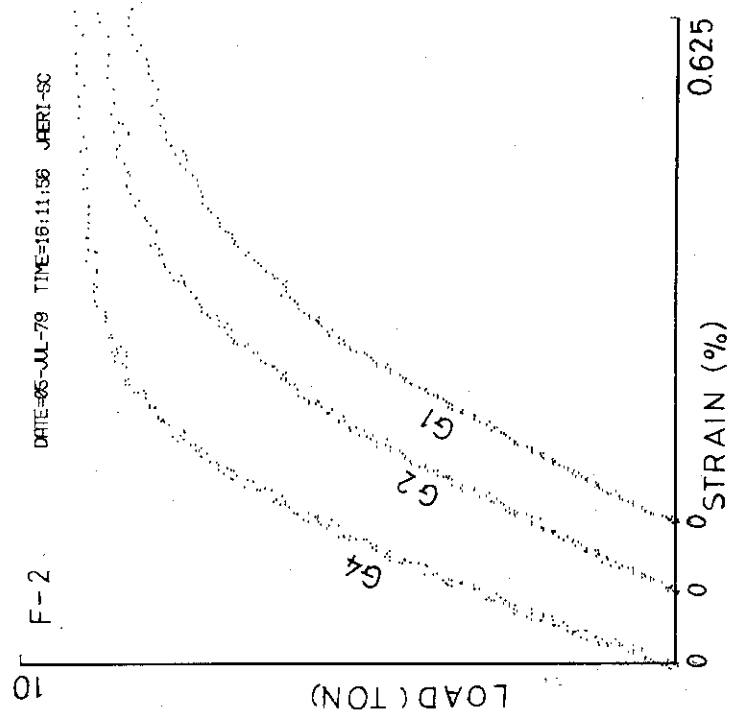


Fig. 3.2 Load-strain diagram (1)

## 4. 硬質電気銅の機械及び電気特性

### 4.1 はじめに

超電導コイルの大型化にともなって、超電導の安定化材にも強度的機能を持たせる必要性が生ずる。日本のLCTコイルの安定化材には、その理由から強度の高い銅（1/2硬質銅）を用いる予定である。しかし、これまで安定化材のデータは小型試験片のデータしかないため、今回は大きな断面積の試験片について実験を行なった。試験片としての銅材は入手の都合上、4.2 Kにおける電気抵抗率が高い材料が使用された。

### 4.2 機械特性

試料はあらかじめ大きめに加工した軟銅を冷間加工を加えることによってLCT実寸法導体形状にし、それを半割にして、断面積を12.6 mm × 13.4 mmにしたものである。測定項目は、引張強度、0.2%耐力及びヤング率で、加工度の範囲は、7、16、27%についてで、温度については、室温、液体窒素温度及び液体ヘリウム温度について実験を行なった。

まず、断面内の冷間加工度の分布を調べるために、常温で断面内の9点についてマイクロ・ビッカース硬度を測定した。測定断面数は4から6でTable 4.1に示す結果はそれらの平均値である。その結果から、加工度が小さくても断面内にはほぼ均一に加工効果が現われていることが判定し、LCT実機使用予定の27%加工材については断面内の均一性は十分であると断定できる。

さらに、引張試験を行なった結果をまとめたのがFig. 4.1である。常温及び液体窒素温度については試料数が2以上であるため、データの信頼性はあるが、液体ヘリウム温度については試料数が1であるため、今後の追試によってデータの結果に変更が生じる可能性は残る。また、この図には示されていないが銅は低温になるにしたがって破断する時の伸びが大きくなり、伸びは室温にくらべて液体ヘリウム温度では約1.9倍となる結果を得た。

### 4.3 電気特性

液体ヘリウム温度における銅材の抵抗率の磁気による影響と、伸びによる影響について実験を行なった。測定した試料は冷間加工度が16%と27%についてである。測定法としては4端子法を用い、分流を防止するために電流端子と電圧端子の間は十分に間隔をとって測定した。その測定結果をFig. 4.2に示す。図中から、磁気による抵抗率の変化については磁界5 Tまでほぼ直線的に上昇することが言え、小型試料との差は生じないことが判明した。伸びについての抵抗率の変化は加工度16%及び27%両方について5,000  $\mu$ ストレインまで変化のなかったことが確認できたが、16%加工材より27%加工材の方が伸びによる抵抗率の上昇は大きいことが判明した。

Table 4.1 Micro Vickers hardness test result

REDUCTION ( % )	DEVIATION OF MEASURED POINT									
	AVERAGE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	88.0	-4.5	-3.5	1.5	-0.8	4.4	-2.5	4.2	5.4	-4.2
16	81.0	2.7	-3.8	-2.0	1.9	-3.0	-7.1	7.7	3.8	-0.3
7	76.7	4.7	-2.4	-6.8	3.9	-3.4	-5.6	9.2	3.3	-3.1

\* MEASUREMENT POINTS

1	2	3
4	5	6
7	8	9

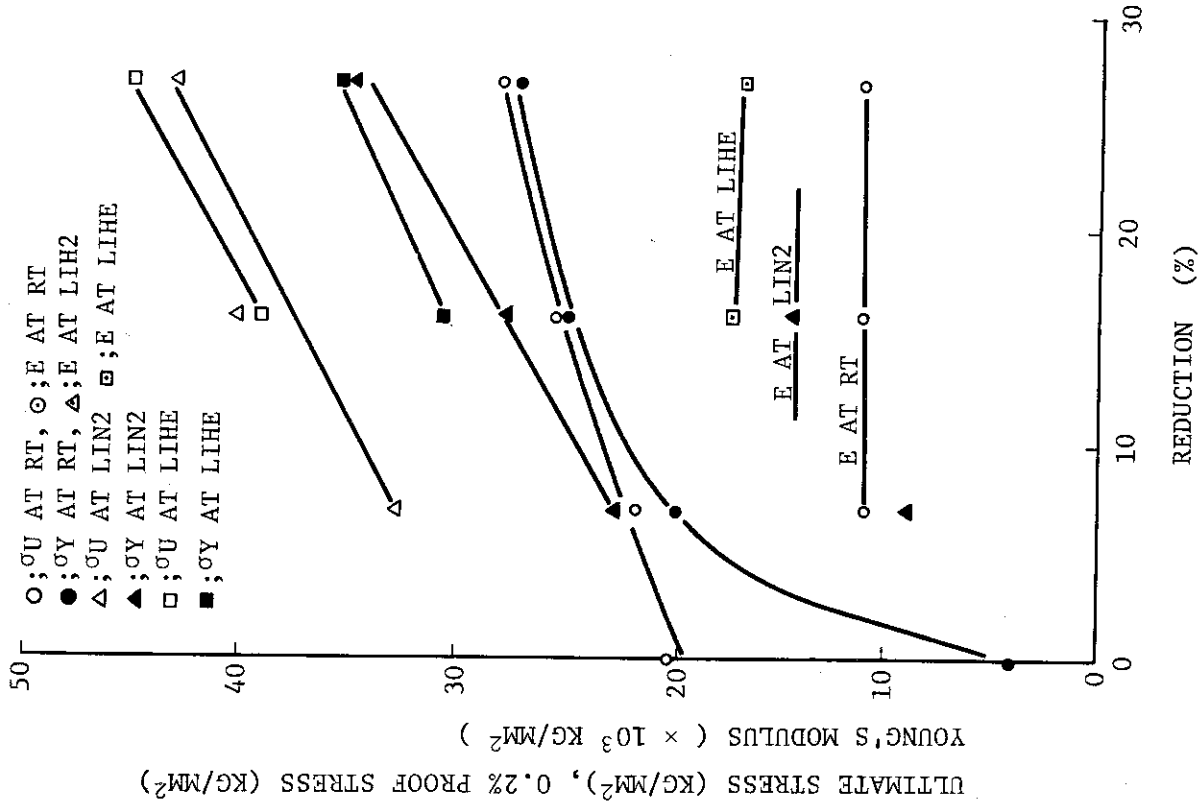


Fig. 4.1 Mechanical characteristics of OFHC copper depending on cold reduction

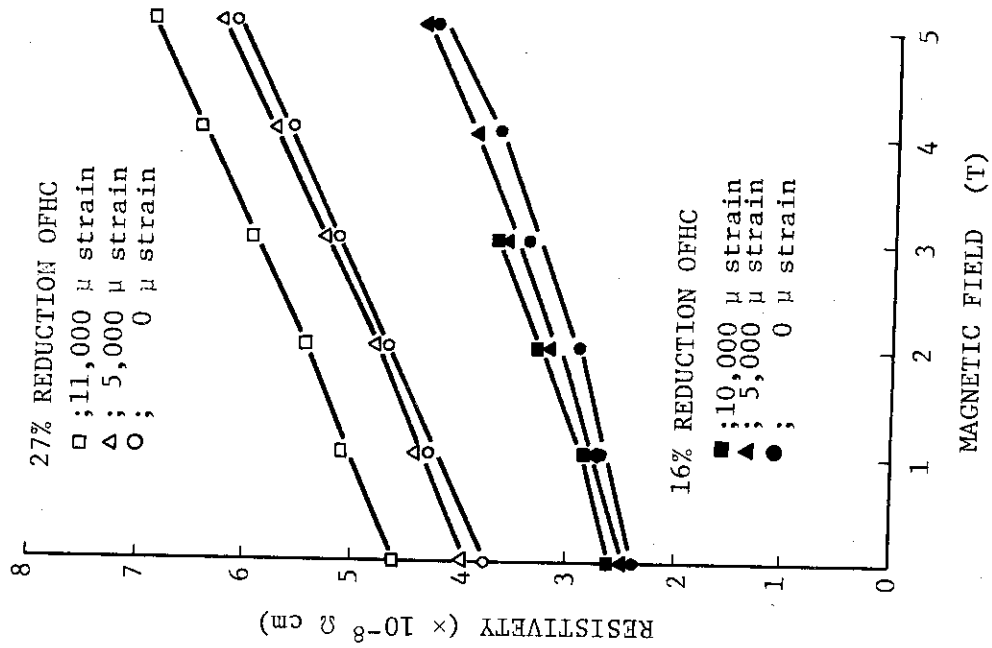


Fig. 4.2 Dependency of hard OFHC copper resistivity on magnetic field

## 5. 超電導々体における超電導線とハンダの特性

### 5.1 はじめに

LCTコイルに使用する超電導々体には、電磁力によって大きな引張応力が発生する。超電導々体は、門型の安定化銅、ストランド状の超電導線（ストランド・ケーブル）および両者を結合させるハンダとから構成されているため、その構成要素であるストランド・ケーブルとハンダの複合材料が、その引張応力に対してどの程度強度部材に成り得るかは、導体設計の上で大きな問題となる。

本報告では、LCT導体の実寸法導体と1/4モデル導体に関して、特にストランド・ケーブルとハンダの複合材料の機械的特性を把握するために、引張試験を行なった結果を記述する。

### 5.2 試料

実験に使用した試料と実験条件をTable. 5.1に示す。試料は、LCT実寸法導体と1/4モデル導体の2種類で、LCT実寸法導体（試料A\*およびB\*）の断面形状をFig. 5.1に、1/4モデル導体（試料AおよびB）の断面形状をFig. 5.2およびFig. 5.3に示す。

LCT実寸法導体および1/4モデル導体の門型安定化銅からストランド・ケーブルとハンダの複合材料を取りはずした門型安定銅だけの試料を、それぞれC\*、D\*およびC、Dとした。試験温度は、室温（300K）と液体窒素温度（77K）の2種類で、B、B\*、DおよびD\*は、室温で、A、A\*、CおよびC\*は、液体窒素温度で試験を行なった試料を示す。

### 5.3 実験方法

極低温応力下試験装置（10トン引張試験機）に、試料を取付け、一定引張速度（5 mm/min）の基で、室温および液体窒素温度の温度条件で引張試験を行なった。このとき、荷重一伸び線図と、導体の各部に貼り付けたストレイレ・ゲージによる荷重一表面歪線図を同時に測定した。引張試験機の最大荷重が10トンであるため、LCT実寸法導体を破断するまで引張ることができないので、以下の検討では、主に1/4モデル導体の引張試験について記す。

### 5.4 実験結果

#### 5.4.1 1/4モデル導体

##### (1) 荷重一塑性歪曲線

1/4モデル導体の荷重と塑性歪の関係を示す、Fig. 5.4に示す。試料BとDは、室温での試験結果を示すが、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料を含む試料Bが、その複合材料の剛性に

相当する分だけ、試料Dより強度が大となる。この場合、複合材料と安定化銅の受け持つ力の比は、約5%以上の塑性歪み領域で、1:1程度となるが、0.2%付近の歪では、約1:4となり、低歪側で複合材料の強度部材としての寄与度は、減少することがわかる。試料Bの歪硬化域の傾きは、試料Cよりゆるやかとなる。これは、複合材料と安定化銅の強化機構の相違に帰因すると考えられる。また、室温での破断歪は、複合材料と安定化銅で同程度で、約17%となる。

試料AとCは、液体窒素温度での実験結果を示す。複合材料を含む試料Aが、2つの破断点を持つことがわかる。最初の破断点は、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料の破断を、また2番目の破断点は、安定化銅の破断を示す。安定化銅の破断歪みは、約33%で、室温での歪みの約1.9倍となるが、複合材料の歪みは、約19.8%で、室温での歪の約1.1倍程度で、温度減少に伴う歪の増加率は、安定化銅より、かなり小さいことがわかる。複合材料の破断後は、試料AとCの荷重-塑性歪曲線は、よく一致する。塑性歪が、約10%から19.8%の範囲で、複合材料を含む試料Aが、試料Cより強度が大となり、複合材料と安定化銅の受け持つ力の比は、室温での結果と同様に、約1:1となる。また、試料Aの歪硬化域の傾きは、試料Cよりゆるやかとなり、室温での結果と同様な傾向を示す。

以上の結果をTable 5.2に示す。表中、Cuは安定化銅を、S・Cは、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料を、および $A_v$ は、両者の平均を示す。室温での0.2%耐力は、安定化銅で $23.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 、ストランドとハンダの複合材料で $10.6\text{kg}/\text{mm}^2$ および導体全体で、 $18.8\text{kg}/\text{mm}^2$ となり、液体窒素温度では、それぞれ $27.2\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $12.7\text{kg}/\text{mm}^2$ および $22.1\text{kg}/\text{mm}^2$ となる。

## (2) 荷重-弾性歪線図

1/4モデル導体の荷重と弾性歪の関係をFig. 5.5に示す。試料AとBおよびCとDの荷重-歪線図の傾きの相違は、温度減少に伴うヤング率の変化を示す。またAとCおよびBとDの相違は、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料の剛性によって生じる差を示す。結果をTable 5.2に示す。室温でのヤング率は、安定化銅で $1.19 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料で $0.62 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、および導体全体で $0.99 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ となり、液体窒素温度では、それぞれ、 $1.37 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $0.86 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ および $1.19 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ となる。温度減少に伴うヤング率の増加率は、安定化銅で1.15倍、複合材料で1.38倍となることがわかる。

## 5.4.2 LCT実寸法導体

LCT実寸法導体の荷重と弾性歪の関係を、Fig. 5.6に示す。試料A\*とB\*およびC\*とD\*の荷重-歪の線図の傾きの差およびAとC、BとDの傾きの差は、それぞれ温度減少に伴うヤング率の変化およびストランド・ケーブルとハンダの複合材料の剛性によって生じる相違を示す。これらの結果をTable 5.3に示す。室温でのヤング率は、安定化銅で $1.13 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、ストランド・ケーブルとハンダの複合材料で、 $0.71 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ および導体全体で $1.04 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ また、液体窒素温度でそれぞれ、 $1.22 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ 、 $0.93 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ および $1.15 \times 10^4\text{kg}/\text{mm}^2$ となり、1/4モデル導体の場合と同様となる。温度減少に伴うヤング率は、安定化銅で1.08倍および複合材料で1.31倍となる。



## 5.5 結 論

LCT コイルに使用する超電導々体の最適設計を行うために、ストランド状の超電導線とハンダから構成される複合材料の機械的性質についての実験研究を行なった結果、以下の結論を得た。

(1) ストランド・ケーブルとハンダの複合材料は強度部材と成り得、その割合は室温の実験結果と一致する。

(2) 導体は塑性伸び約 20 % まで破断しない。銅材はさらに伸びが 33 % まで破断しない。

実際の超電導々体は、液体ヘリウム温度で使用されるため、その温度でのストランド・ケーブルとハンダから構成される複合材料の機械的性質について実験研究する必要がある。しかし、複合材料の機械的性質について実験研究する必要がある。しかし、複合材料の機械的性質、例えばヤング率や 0.2 % 耐力の室温と液体窒素温度との比率から推察すると、液体ヘリウム温度でのこれら機械的性質は液体窒素温度と同じ位の値となると考えられる。

Table 5.1 Conditions of the test sample

		77 (K)	300 (K)
1/4 MODEL CONDUCTOR	OFHC HOUSING WITH SUPER- CONDUCTOR & SOLDER	A	B
	OFHC HOUSING	C	D
LCT CONDUCTOR	OFHC HOUSING WITH SUPER- CONDUCTOR & SOLDER	A*	B*
	OFHC HOUSING	C*	D*

# A, B, C, D, A\*, B\*, C\* & D\* IS SAMPLE NAME.

Table 5.2 Mechanical properties of 1/4 model conductor

SAMPLE	(E) <sub>CU</sub>	(E) <sub>S,C</sub>	(E) <sub>AV</sub>	( $\sigma_{0.2}$ ) <sub>CU</sub>	( $\sigma_{0.2}$ ) <sub>S,C</sub>	( $\sigma_{0.2}$ ) <sub>AV</sub>	( $\sigma_u$ ) <sub>CU</sub>	( $\sigma_u$ ) <sub>S,C</sub>	( $\sigma_u$ ) <sub>AV</sub>	$\epsilon$ (%)	T(K)
A	1.37	0.86	1.19	27.2	12.7	22.1	39.1	59.6	46.3	(19.8) <sub>S,C</sub> (33.2) <sub>CU</sub>	77
B	1.19	0.62	0.99	23.2	10.6	18.8	24.7	46.2	32.2	17.5	300
C	1.37	—	1.37	27.2	—	27.2	39.1	—	39.1	33.5	77
D	1.19	—	1.19	23.2	—	23.2	24.7	—	24.7	17.0	300

# E ; YOUNG'S MODULUS ( $\times 10^4$  KG/MM<sup>2</sup>) $\sigma_{0.2}$  ; 0.2 % PROOF STRESS (KG/MM<sup>2</sup>) $\sigma_u$  ; ULTIMATE STRESS (KG/MM<sup>2</sup>) $\epsilon$  ; PLASTIC STRAIN (%)

Table 5.3 Young's modulus of LCT conductor

SAMPLE	$(E)_{CU}$ $\times 10^4 \text{KG/MM}^2$	$(E)_{S,C}$ $\times 10^4 \text{KG/MM}^2$	$(E)_{AV}$ $\times 10^4 \text{KG/MM}^2$	T (K)
A*	1.22	0.93	1.15	77
B*	1.13	0.71	1.04	300
C*	1.22	—	1.22	77
D*	1.13	—	1.13	300

#  $(E)_{CU}$  ; OFHC YOUNG'S MODULUS       $(E)_{S,C}$  ; SUPERCONDUCTOR YOUNG'S  
 $(E)_{AV}$  ; AVERAGE YOUNG'S MODULUS      MODULUS

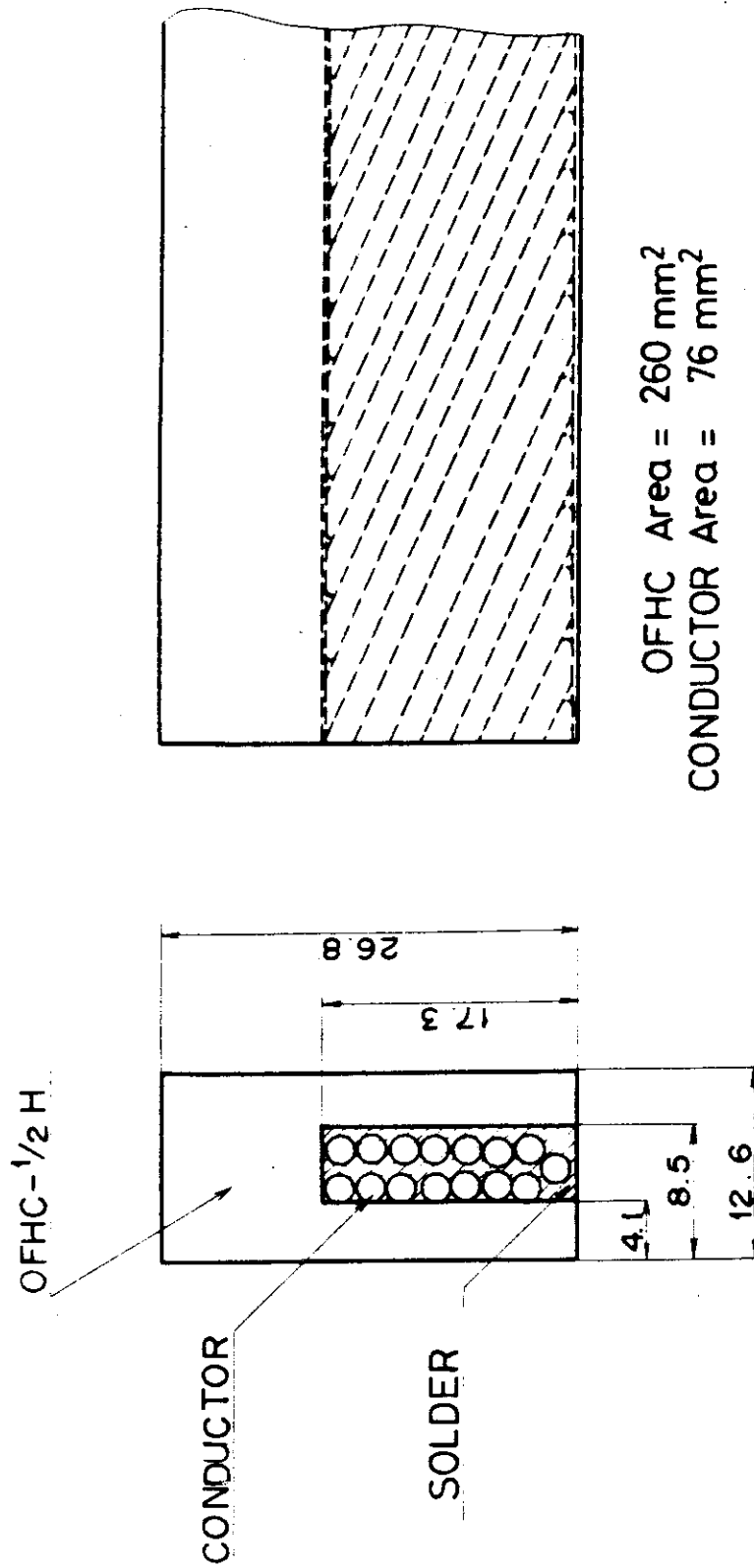


Fig. 5.1 LCT conductor cross-section

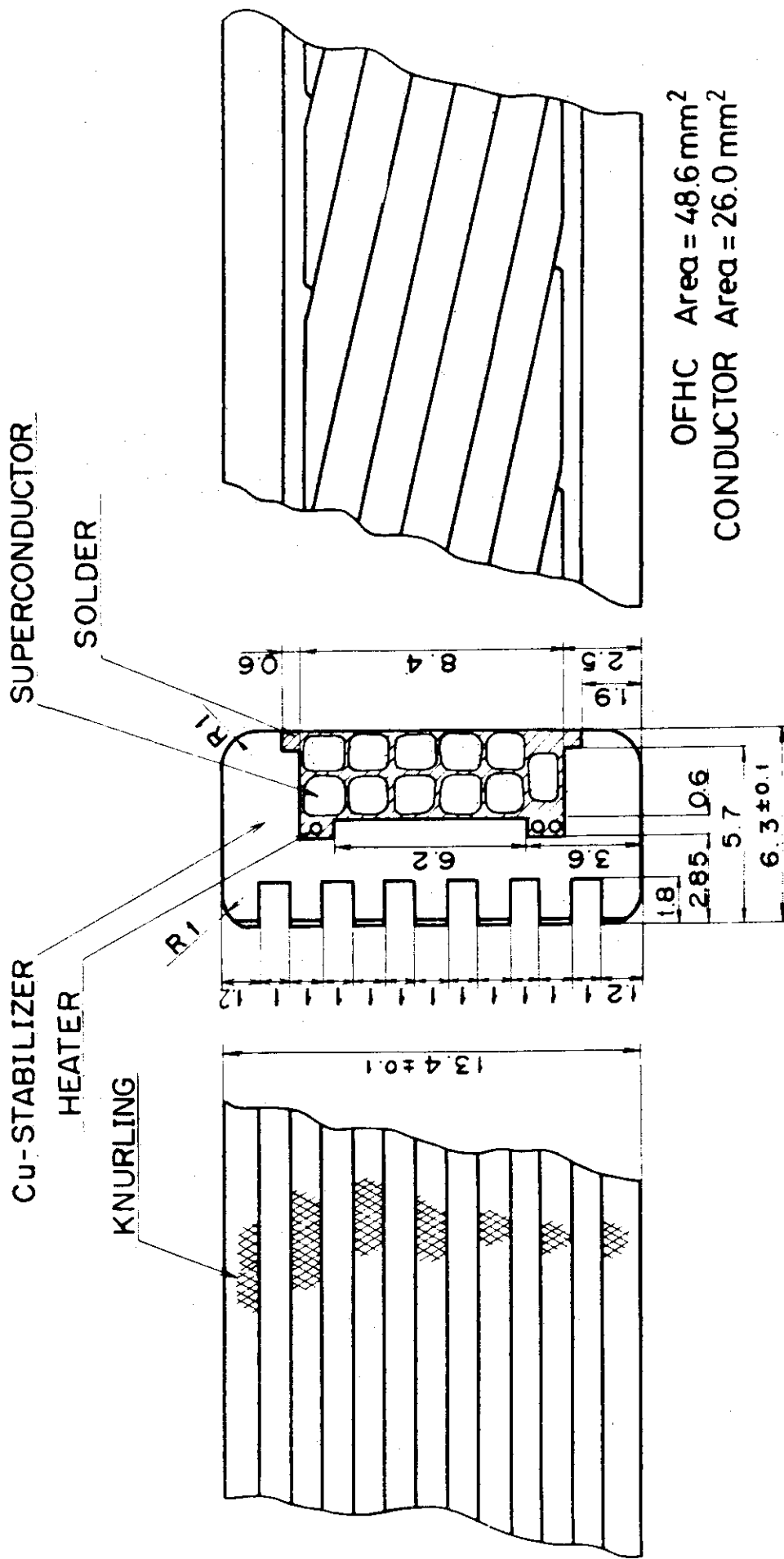


Fig. 5.2 1/4 model conductor cross-section

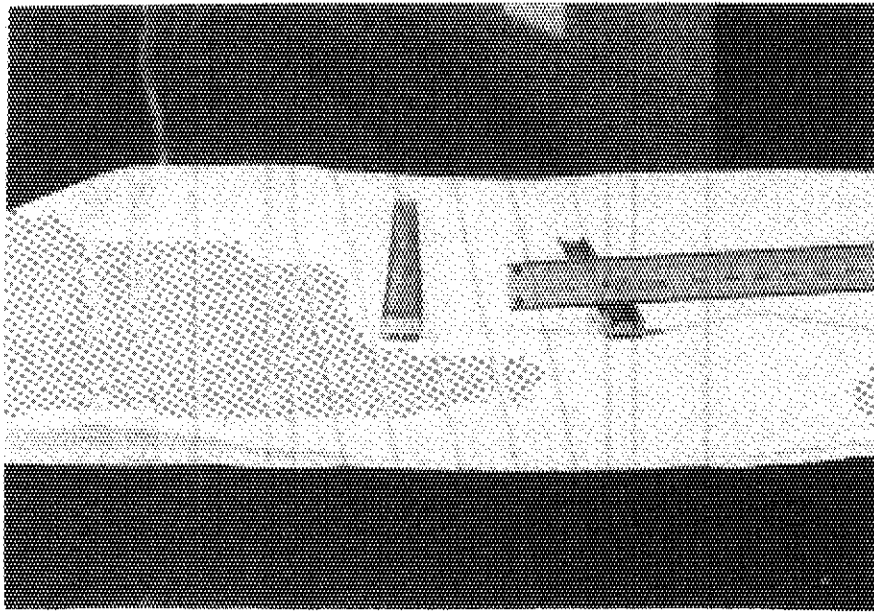


Fig. 5.3 1/4 model test piece

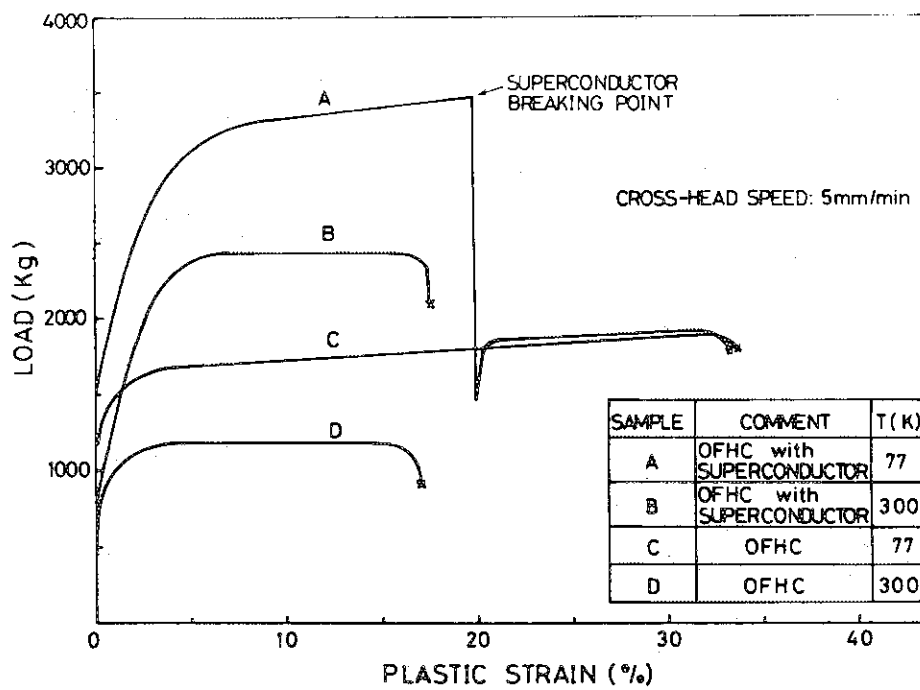


Fig. 5.4 Load-plastic strain curves of 1/4 model conductor

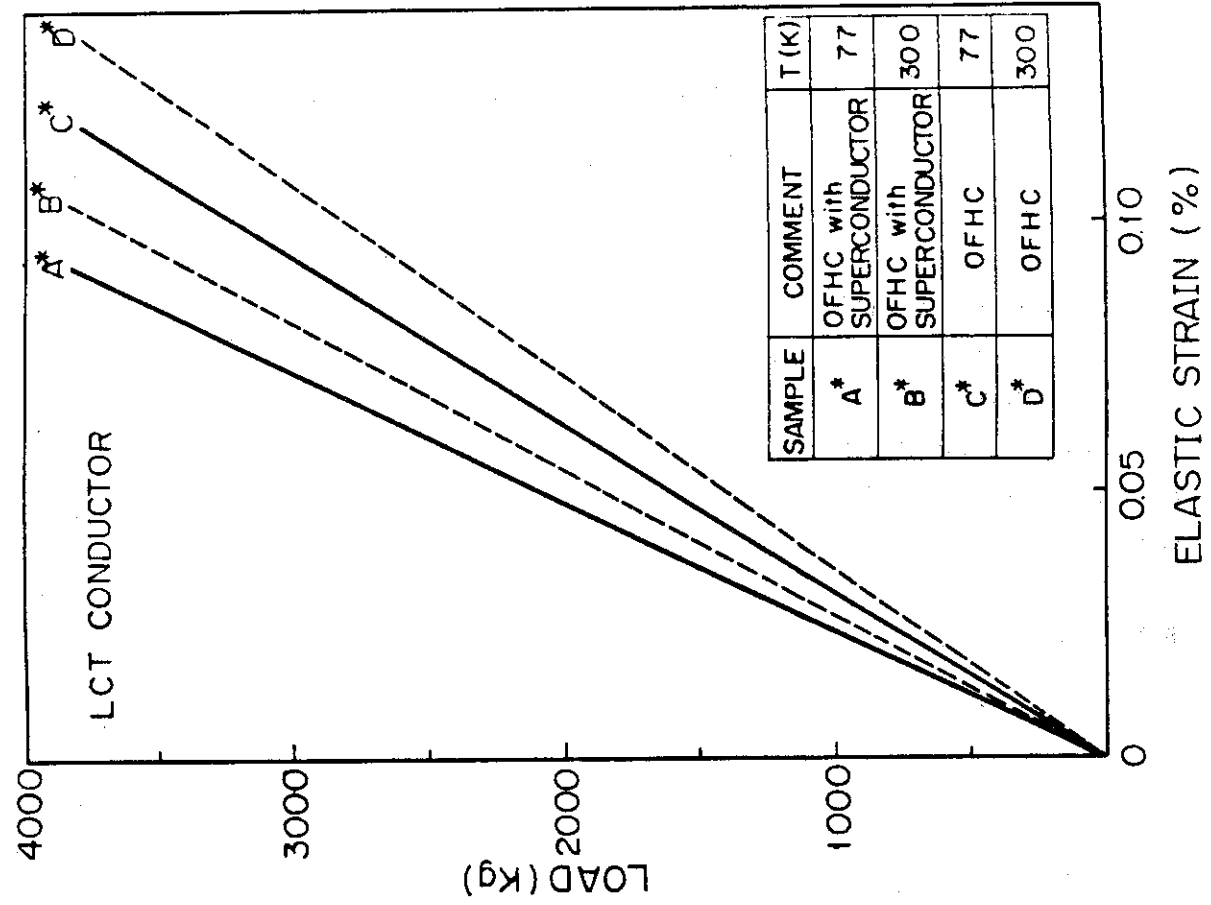


Fig. 5.6 Load-elastic strain diagram of full size conductor

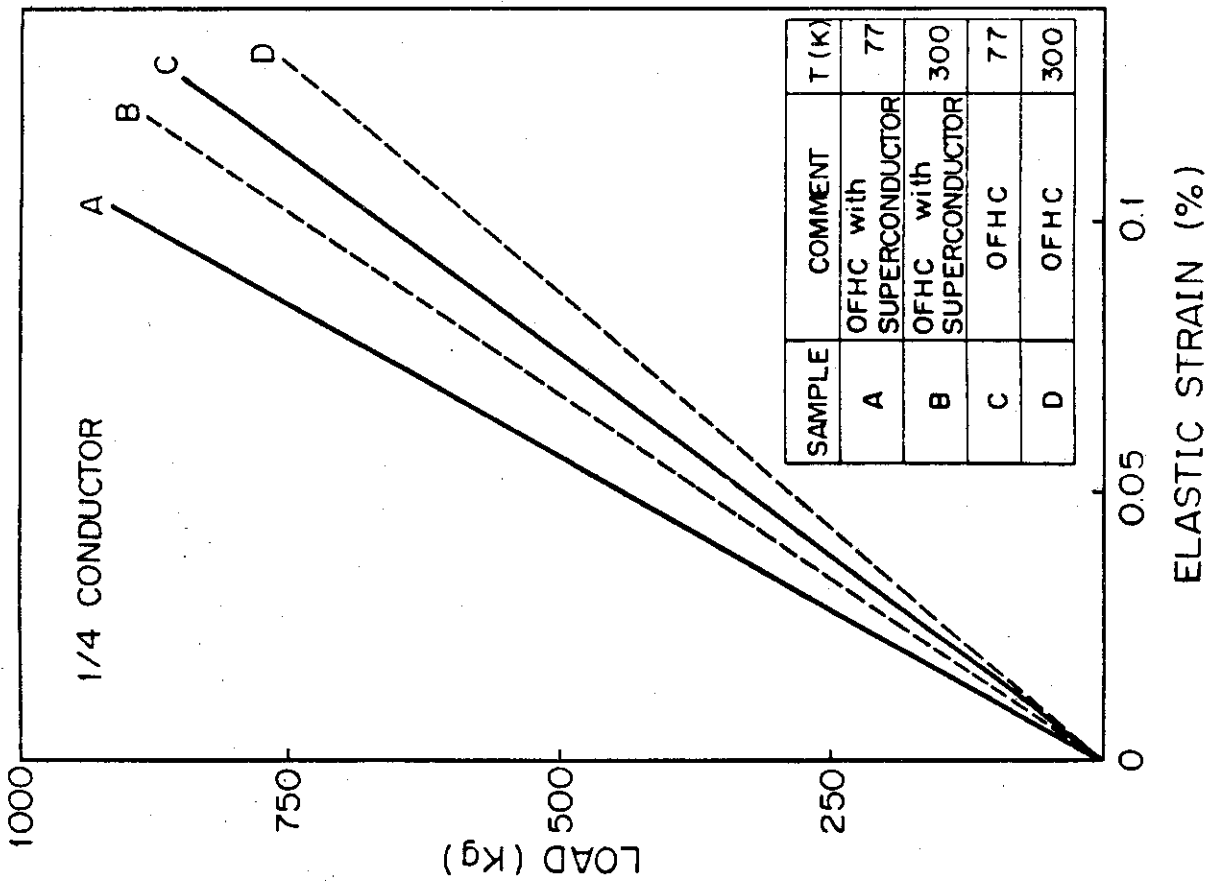


Fig. 5.5 Load-elastic strain curves of 1/4 model conductor

## 6. LCT 1/4ヘリウム容器面外力試験

### 6.1 目的

LCTの実験計画では注目している試験コイルの隣接コイルが電気磁氣的に欠落した条件がその一つとして含まれている。この条件では、試験コイルは全体で3,200トンの面外力を受け、ヘリウム容器の角部に集中応力が発生することが三次元応力計算で判明している。この集中応力の値は、有限要素法のためのモデル化の手法によって大きく異なり、真の応力を解明するには実験による計算結果の確認を行う必要がある。本章では、この角部応力の解明のために作成した1/4モデルを用いた実験結果、及び二次元有限要素法計算結果について述べる。

### 6.2 実験モデルの設計、製作

実験モデルは実際のLCTコイルのトーラス中心側での上下対称面付近を取り出し、それを1/4に縮小したものである。なお、荷重を加える装置は10トン引張試験機を流用したため、力を加える面は等分布荷重となる。製作した1/4モデルの形状をFig. 6.1及びFig. 6.2に示す。この実験モデルの製作には、詳細設計されたLCTコイルのヘリウム容器を正確に1/4になるようにし、製作にあたっては、0.1mmの精度まで注意が払われた。ただし、ヘリウム容器の角部は直線化し、1/4モデルを2分割できるようにしたのは、測定及び組立上の問題からである。このモデルに使用した材料は、使用温度におけるSUS 304Lのヤング率に近い材料であるS45Cである。

### 6.3 実験方法

本実験の目的は、材料の弾性的性質の範囲内で外力と構造材内部に生ずる応力の関係を求めることである。材質の物理定数を性格に知るために、試験片と同一材の試料の室温引張り試験を実施した。測定により得られたS 45C材のヤング率は $1.99 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 、0.2%応力は $33.8 \text{ kg/mm}^2$ であった。

試験体系をFig. 6.3及びFig. 6.4に示す。図に示す様に試験装置のクロス・ヘッドにL字型テスト・スタンドを固定し、1/4モデルは、テスト・スタンドにサポート板を介してボルトで接続した。力は、プルロッドに連結したつり上げ具によって加えた。力が1/4モデルに伝達される面には、FRP、ゴム等の材料をはさみこんが、材料の入れ換えは、実験結果に影響しなかった。

実験では、ストレイン・ゲージによる表面各点の主応力測定、及びダイヤル・ゲージによる変位量の測定を行なった。ストレイン・ゲージ接着位置をFig. 6.5 (a)に示す。ストレイン・ゲージは、試験片の中心線上に合計25点に接着している。計算との比較検討に正確を期するため接着位置は、正確な位置測定を行なった。ダイヤル・ゲージによる変位量測定位置をFig. 6.5 (b)に示す。測定点は6点である。なお、前述の通り、実験を弾性範囲内で行なうため、1/4モデ



ルに加える最大荷重は、全体で 2 ton までに制限した。

#### 6.4 二次元応力解析

実験結果との比較検討のため有限要素法による二次元応力解析を行なった。計算に用いた二次元要素分割図を Fig. 6.6 に示す。図の様に解析では、Fig. 6.2 に示した実験体系を忠実にモデル化した。試験片は、全体で 630 の平面応力要素に分割し、つり上げ具と試験片の間は、20 本のトラス要素を用いた。荷重は、実験条件に合わせてつり上げ具に等分布荷重として入力した。計算ではさらに実際の LCT コイルと同様の分布荷重についても合わせて計算を行なった。なお使用した応力計算コードは“SAPV 2”である。

#### 6.5 計算結果，及び実験結果

Fig. 6.7 に試験片の内側と外側の表面上の主応力値の計算値，並びに実験結果を示す。図の横軸は、内周，外周のペリメーターであり，原点は図の通りである。図の左側の縦軸は、荷重として加える面外力を LCT 実機の 1/5 にした場合のスケール，右側は実際のコイルにかかる圧応力のスケールである。実線及び破線が二次元解析による主応力値の計算結果，丸が実測値であり，良い一致が見られる。なお計算結果にあらわれたピークは，角部に対して曲率を考慮していないために生じたものである。また，変位量の計算結果，並びに測定結果を Table 6.7 に示す。計算値と実測値間の差は主としてボルト結合部のガタによるものと考えられる。なお，実際の荷重分布条件に合わせた二次元解析結果は，等分布荷重の場合にくらべて 12% 減少した。

#### 6.6 まとめ

以上の議論から次の様な結論が得られた。

- (1) LCT コイルの角部応力解析は二次元で進めることが可能である。
- (2) 巻線部を考慮しない最悪の計算条件で，LCT コイルの角部応力は約  $65\text{kg}/\text{mm}^2$  となる。  
(実際の荷重分布条件で計算した結果)

Table 6.1 Measured and computed displacement  
at 2,000 Kg loading

GAUGE NO.	MEASURED DISP. (mm)	NODE NO.	COMPUTED DISP. (mm)
1	0.946	253	0.528
2	0.760	510	0.494
3	0.166	133	0.068
4	0.080	121	0.028
5	0.714	199	0.428
6	0.092	121	0.028

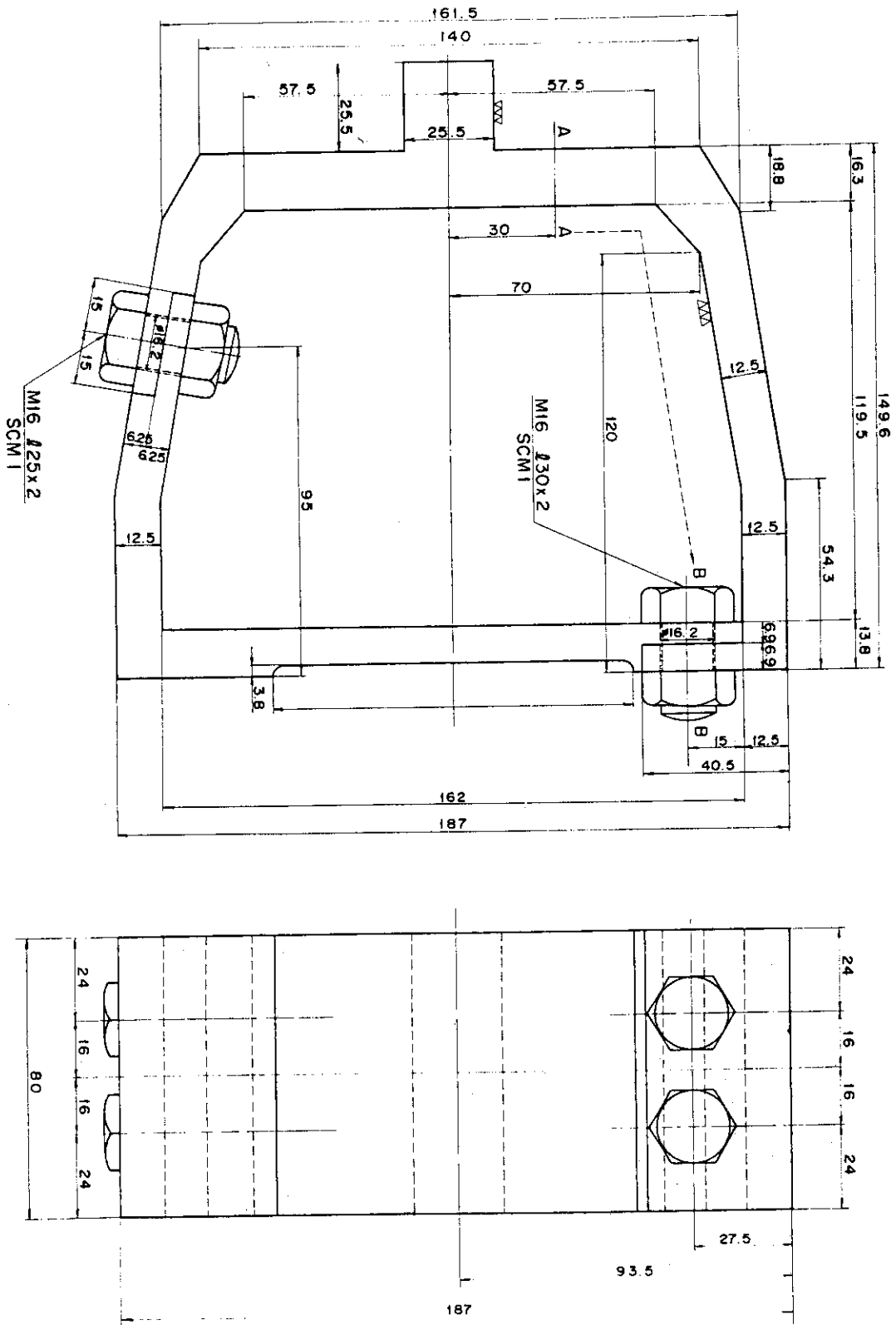


Fig. 6.1 The detail drawing of the 1/4 model of helium vessel

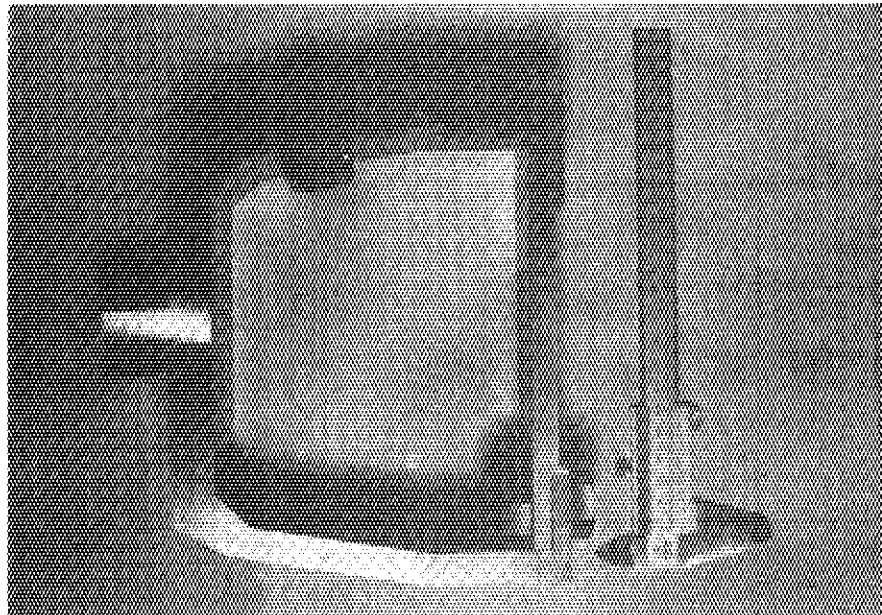


Fig. 6.2 A picture of the 1/4 model

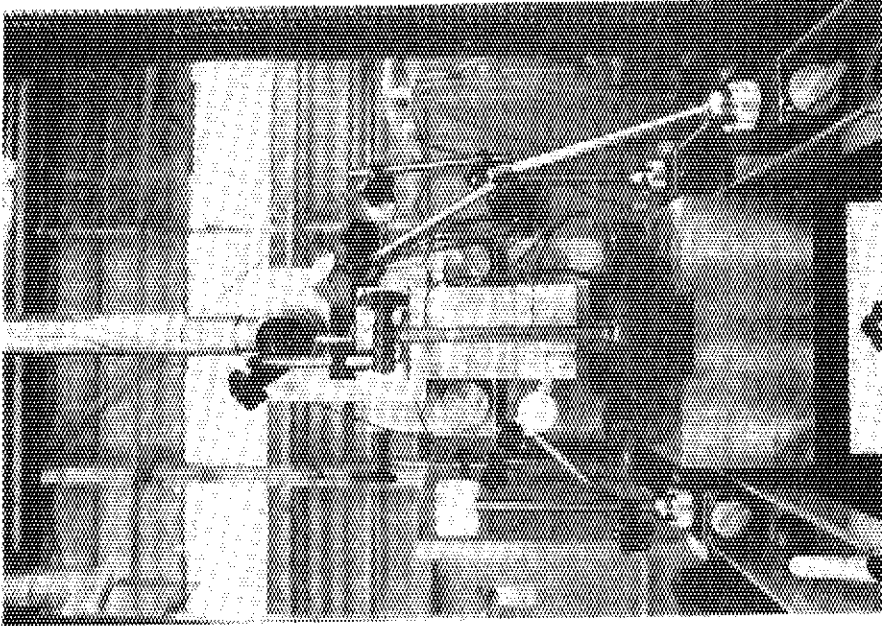


Fig. 6.4 A picture of the model during the measurement

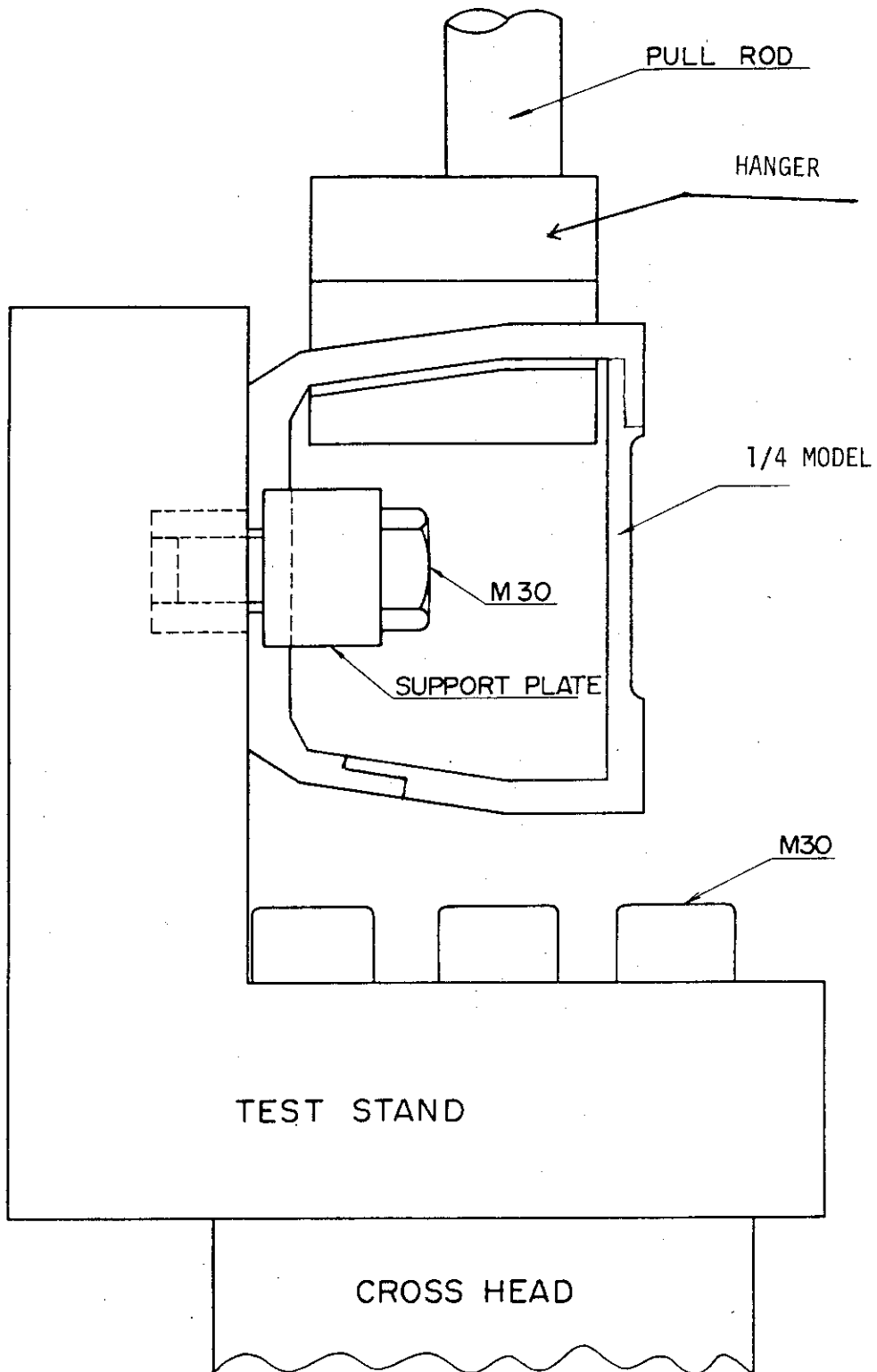
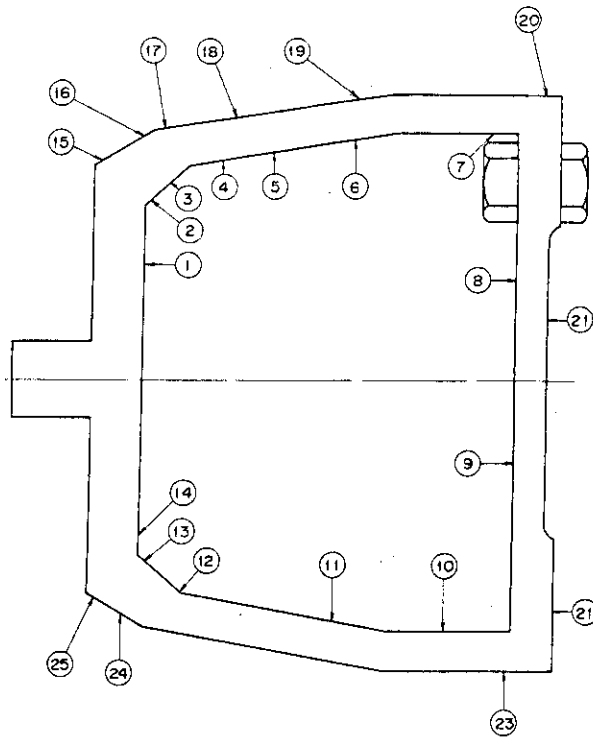
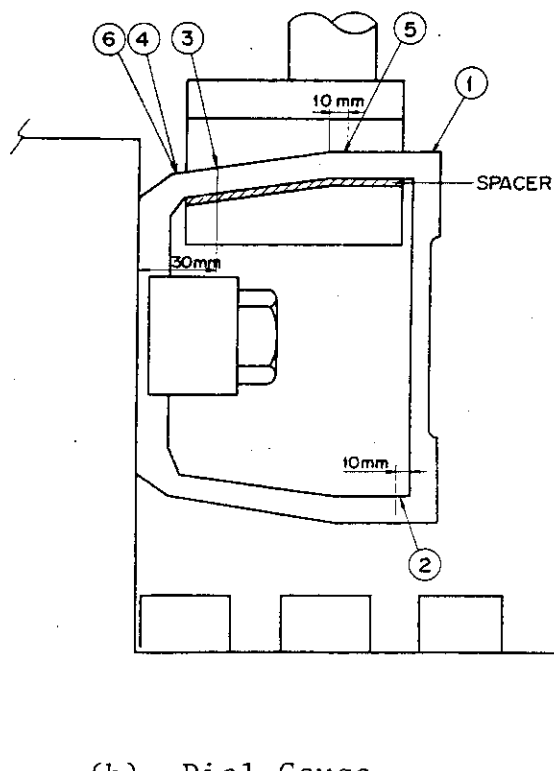


Fig. 6.3 The setting of the 1/4 model



(a) Strain Gauge



(b) Dial Gauge

Fig. 6.5 Position of the strain gauges and the dial gauges

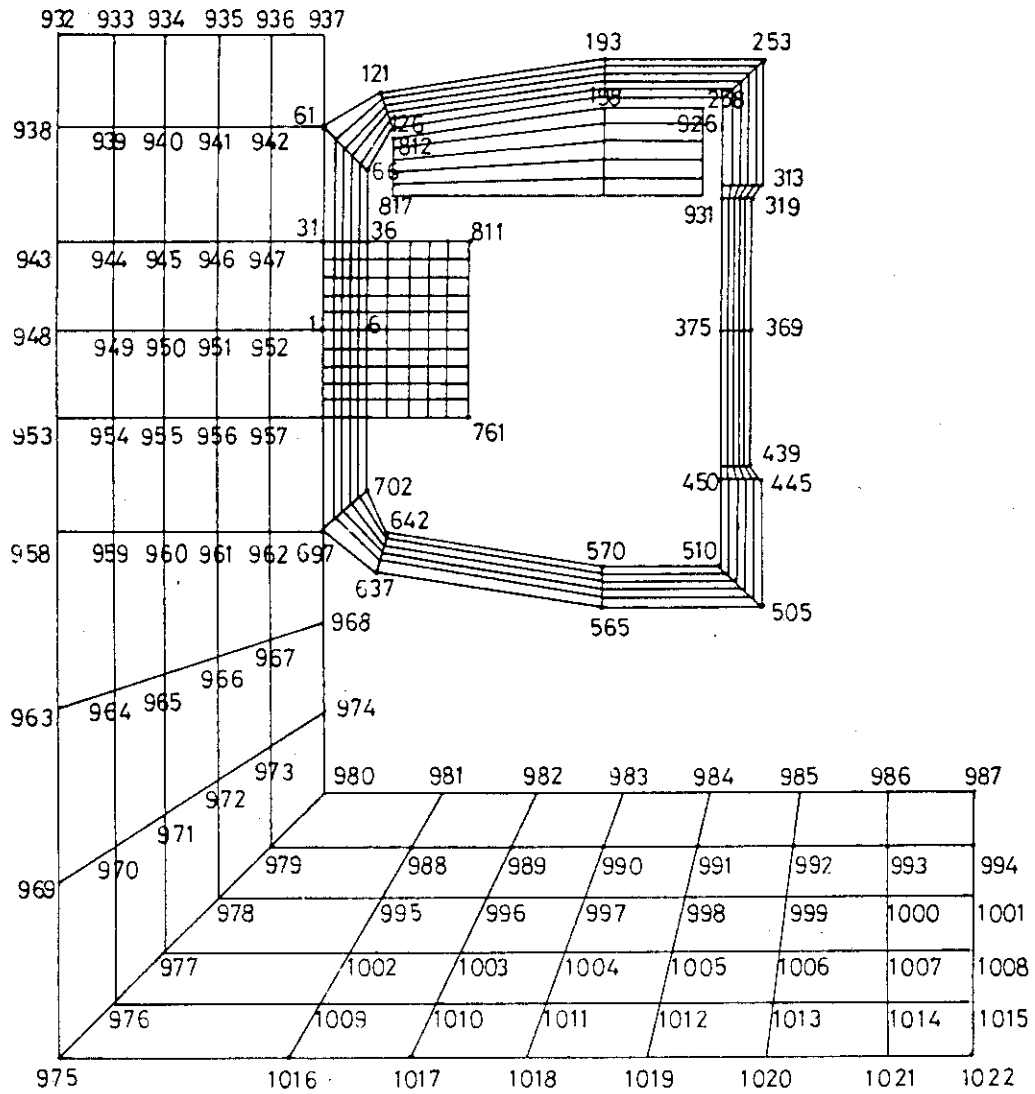


Fig. 6.6 The computer calculation model

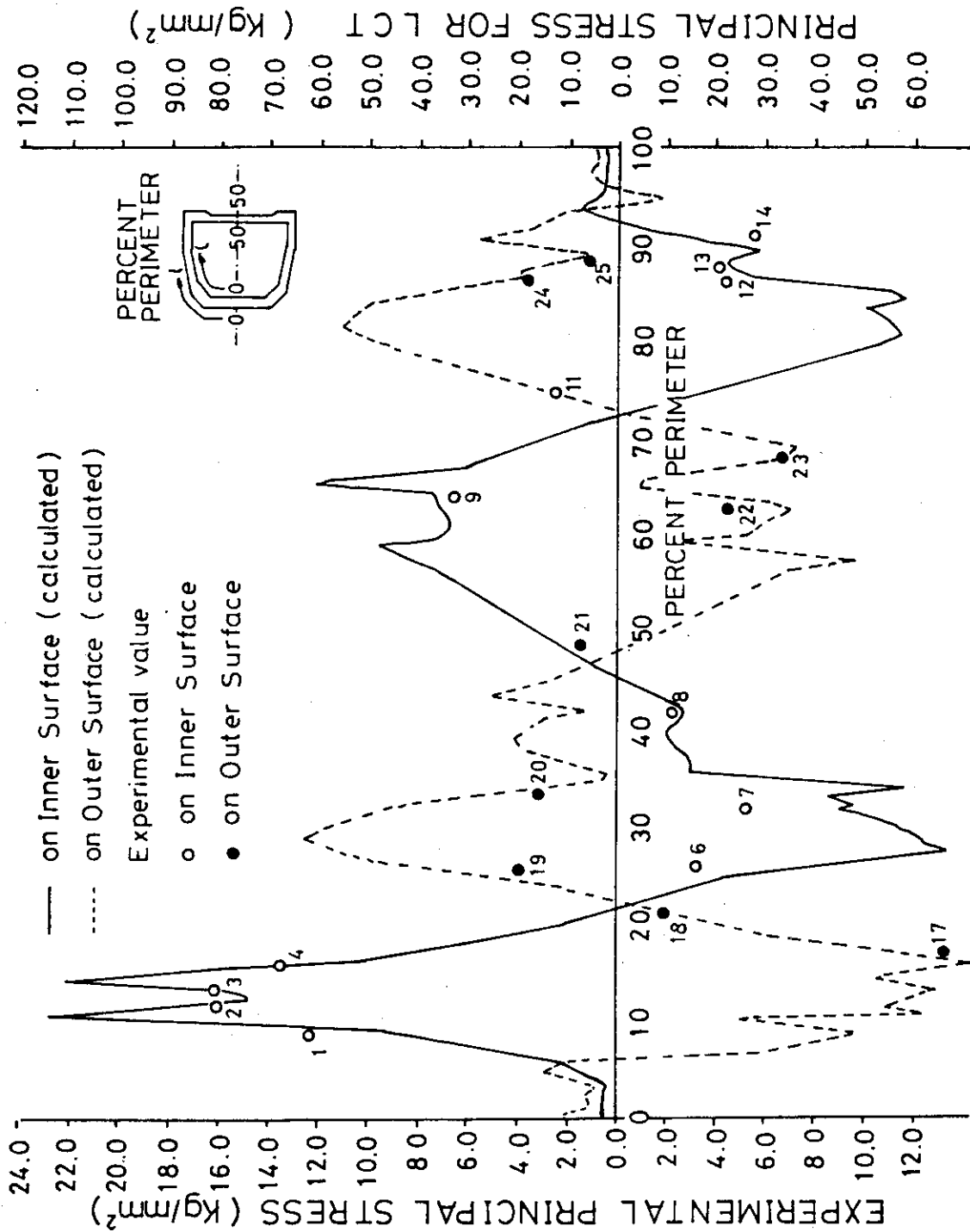


Fig. 6.7 Comparison of calculated principal stresses with experimental values



## 7. 極低温，強磁場中でのストレイン・ゲージの特性

### 7.1 まえがき

IEA-LCTコイルの性質の診断及び運転モニタに使用する各種の測定素子の一部として，ストレイン・ゲージの液体ヘリウム温度における諸特性について実験を行なったので報告する。実験を行なった項目は以下の通りである。

(1) 室温に対する液体窒素温度（77k），液体ヘリウム温度（4.2K）温度におけるゲージ率の変化

(2) ストレイン・ゲージの温度変化による見掛歪

(3) 液体ヘリウム温度においての磁界による見掛歪。また，本件で使用したストレイン・ゲージの仕様は以下の通りである。

型式名：KFL - 5 - C 1 - 16

構造：ゲージ長 5 mm，グリット幅 2.5 mm

ベース長×幅 10 × 3.5 mm

特性：ゲージ率 2.17（20℃）

基準抵抗  $P 20 \pm 0.5 \% \Omega$

耐電圧 AC 900 V

DC 1,500 V

さらに，使用した接着材はUC - 27A，コーティング剤はC - 5であった。

### 7.2 ゲージ率の温度変化

実験はNAS - 942 に準じて製作した検定用治具に試験片をセットし，Fig. 7.1 がその形状であり，Fig. 7.2 がストレイン・ゲージを装着したところの写真である。そのサンプル・ホルダを室温，液体窒素温度，及び液体ヘリウム温度で試験片に正確な歪を加え，その出力の変化からゲージ率を検定した。ゲージ率の変化は，室温の値と各温度における値の比で示し，Fig. 7.3 に示す結果を得た。注目する結果は図が示すように，室温から液体窒素温度まで上昇する値が，液体窒素温度から液体ヘリウム温度まで間は変化がなくなる点である。しかし，まだそれらの間の温度については測定していないため液体窒素温度から液体ヘリウム温度の間を直線で結べるかどうかは，明らかでない。

### 7.3 ストレイン・ゲージの温度変化による見掛歪

温度変化によって発生する熱出力（見掛歪）を測定するためにFig. 7.4 に示す温度ホルダを求めて測定した。Fig. 7.5 は実験にストレイン・ゲージをセットした所の写真である。その測定

結果をFig. 7.6 に示す。その内で室温から液体窒素温度までのデータはすでに求められているので、今回は液体ヘリウム温度から液体窒素温度までを詳細に測定した。注目する結果は15 K 近においてゲージの熱出力に変曲点があることが判明した点である。

#### 7.4 磁界特性

磁界中の特性は、応力下試験装置を用いて測定し、その測定結果はFig. 7.7 に示してある。この場合の磁界の方向はゲージに垂直である。パラメータとしての歪はQと2,000  $\mu$ s の2 ケースとした。結果から歪の大きさによって磁界の見掛歪は小さく、また絶対値も大きくないので、この程度は測定法に2ゲージ法を用いれば消去できることが判明した。しかし、LCTでは磁界が最高で9 Tまで上るので、今後高磁界の特性について求めてゆく方針である。

#### 7.5 まとめ

以上の実験によりストレイン・ゲージの大まかな諸特性は把握できたが、今後以下の点について実験を含めた検討を行なっていく予定である。

- (1) 5,000  $\mu$ ストレインまでの絶対値測定の実証。
- (2) 温度による見掛歪を打ち消す手法と、熱応力の測定技術の確立。
- (3) 磁界中での歪の測定法の確立。

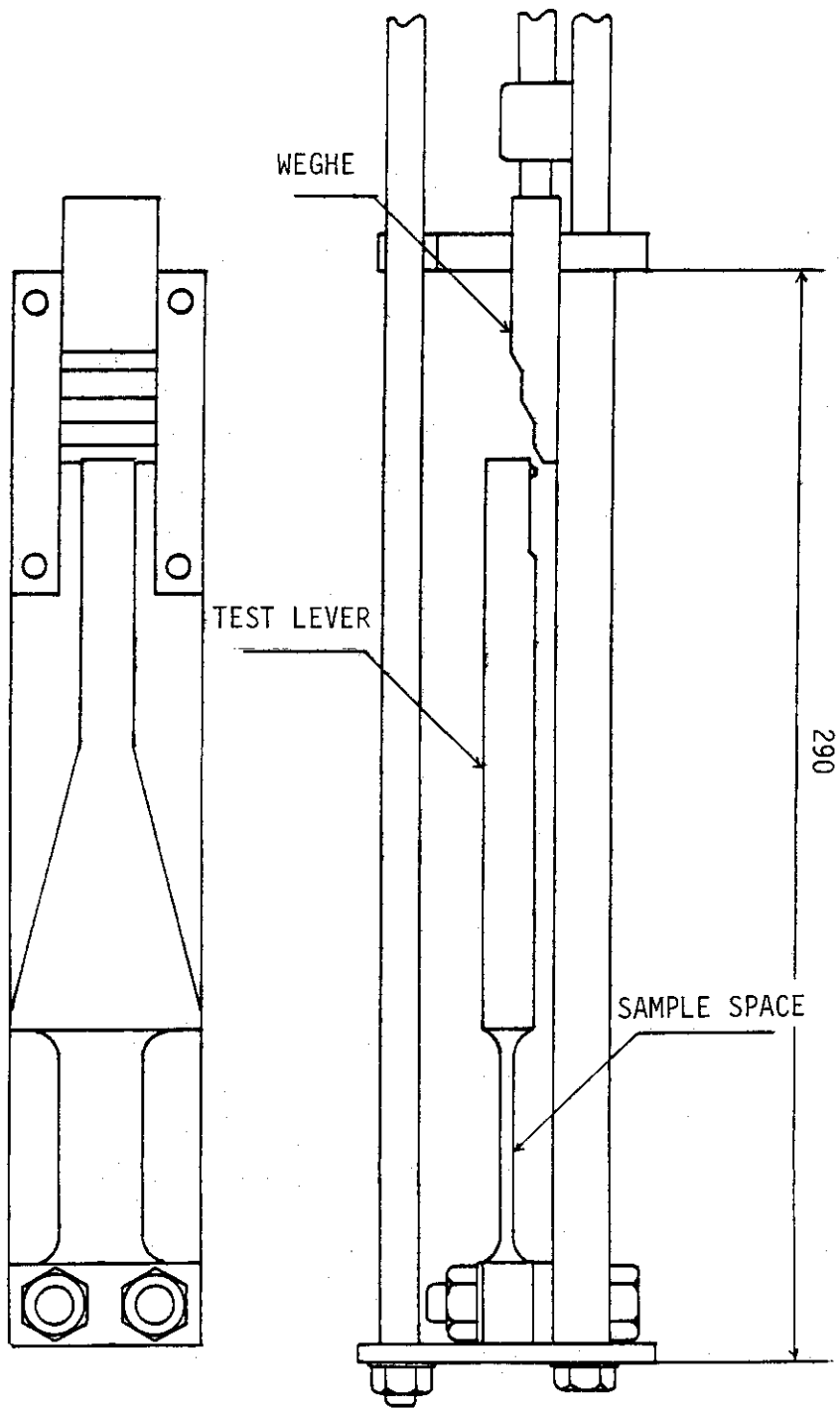


Fig. 7.1 Test piece for gauge factor colibration of strain gauge

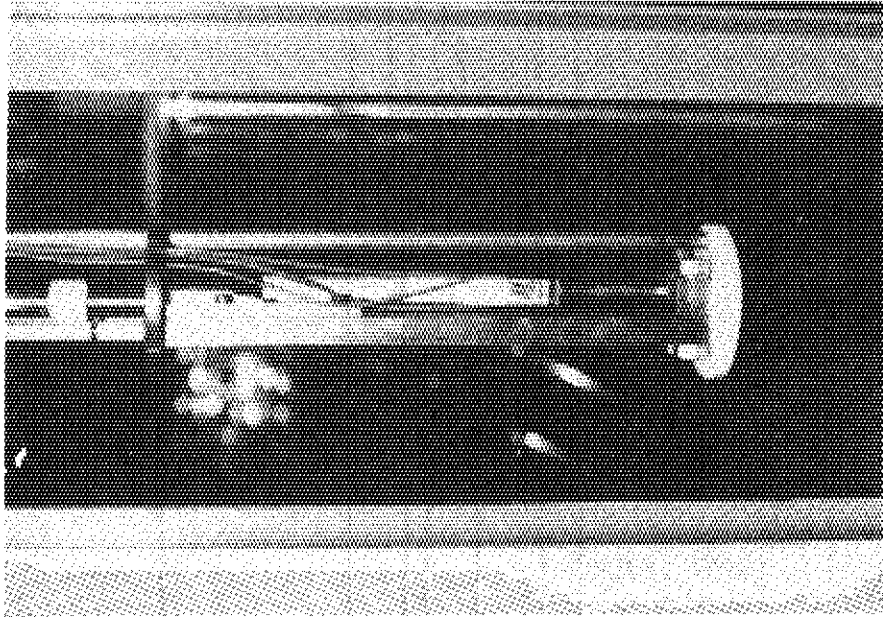


Fig. 7.5 Over view of the constant temperature sample holder

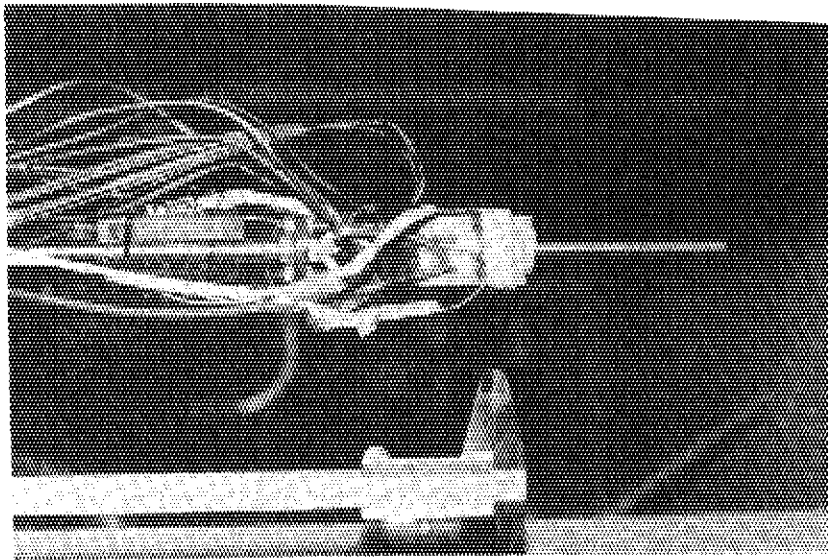


Fig. 7.2 A picture of the test piece

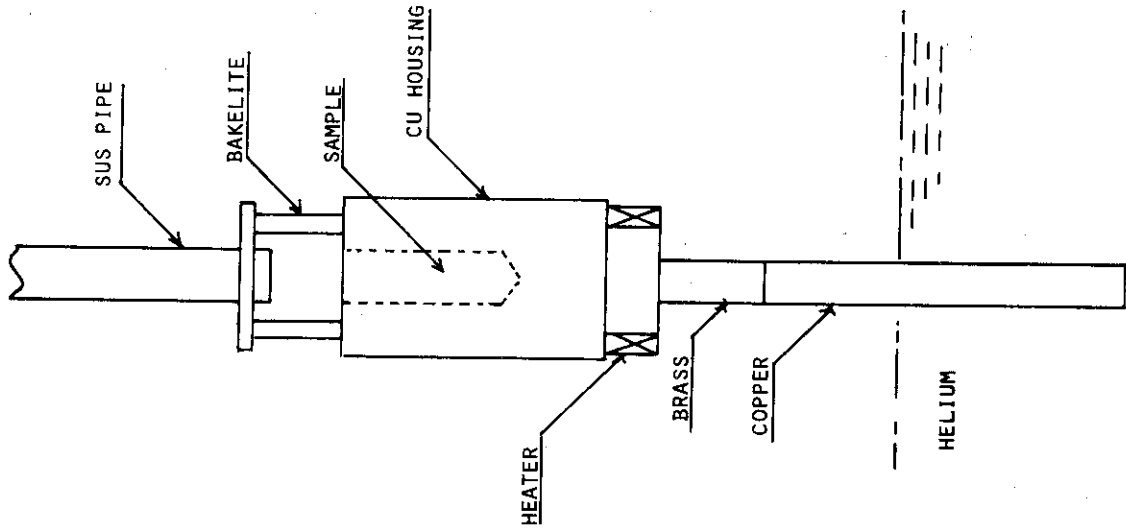


Fig. 7.4 The constant temperature sample holder

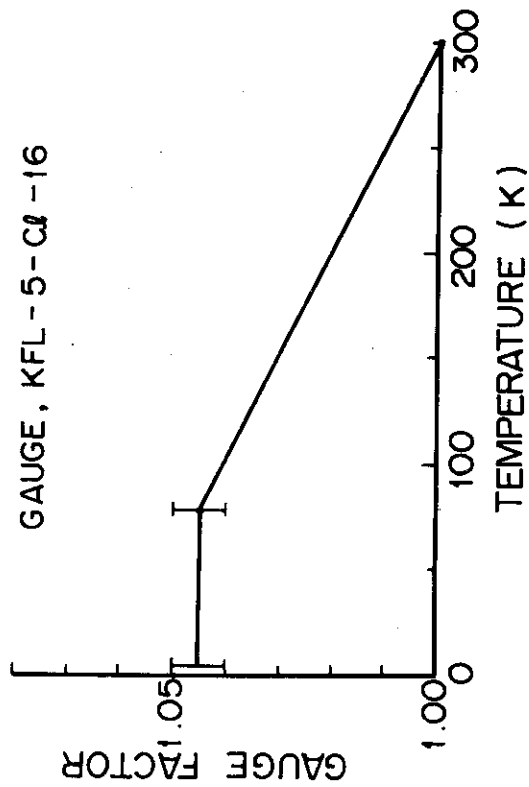


Fig. 7.3 Gauge factor as a function of temperature

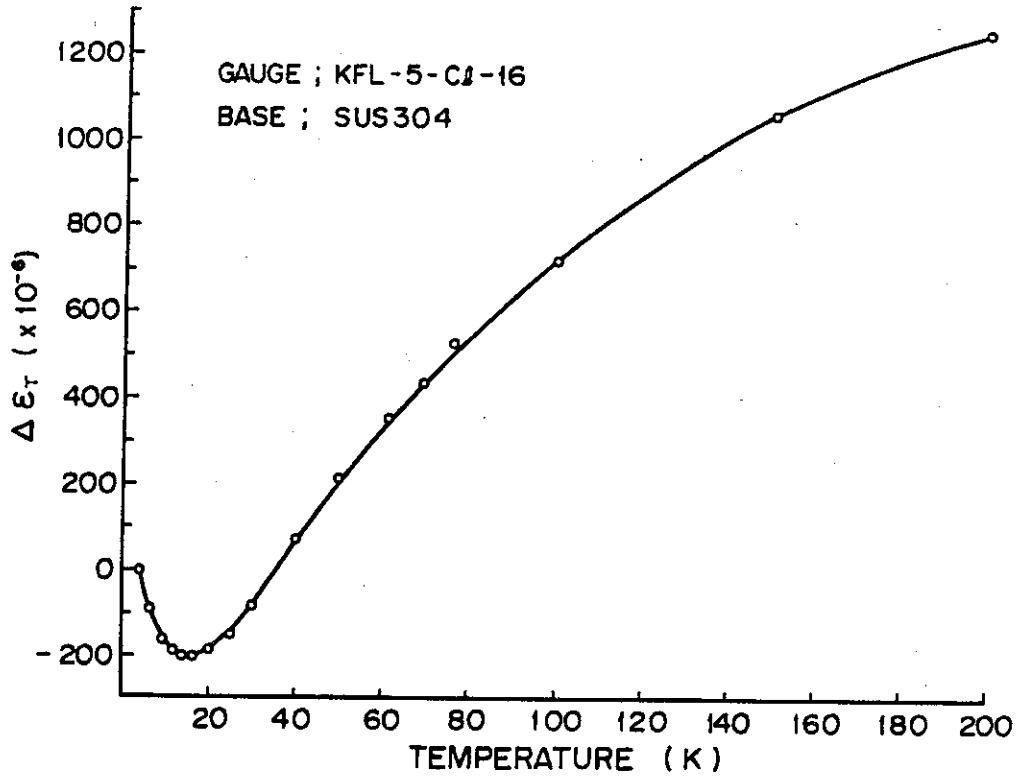


Fig. 7.6 Thermal virtual strain

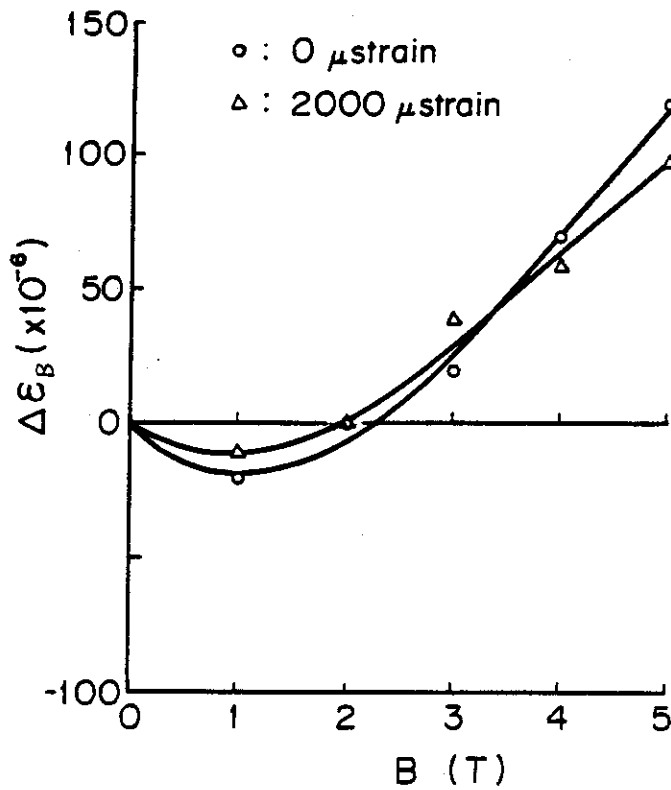


Fig. 7.7 Magnetic virtual strain

## 8. お わ り に

以上の実験結果はLCTコイルの詳細設計及び製作設計に重要なデータを与えることができた。さらに、製作設計を行なうにあたって実施される製作実証試験の方法及び結果に対して、実施要領及び評価基準を得ることができた。今後も、重要と思われる点、詳細設計時に予測できなかった問題が発生した場合はすみやかに実証試験を行なっていく予定である。

さらに、本報告書に記された実験結果の内容は、次期装置の開発研究のためのデータ及び問題解析手法となりえるものと思われるので、より深い問題分析を進めていきたいと思う。

### 謝 辞

本報告に記述した作業は森副所長、小幡核融合研究部長の指揮下に行われたもので、両長に対し日頃の激励に感謝いたします。又、専門的立場から常に御指導いただいている安河内特別研究員に感謝の意を表します。本報告は島本研究室長の研究室運営のための多大な努力の結果が実ったものであることをここに記します。実験に当っては安藤、辻、西研究員からの協力を得ました。

住友電工、共和電業等の方々からは試料の提供、時には実験に参加していただいたことに、ここに御礼を申し上げます。

### 参考文献

- (1) 島本進, "核融合トカマク用超電導磁石の開発" 日本原子力学会誌, Vol. 21, No. 3 (1979)
- (2) 安藤俊就, 他, "応力下超電導特性測定装置", 低温工学, Vol. 13, No. 3 (1978)
- (3) "LCT用超電導磁石詳細設計", 内部資料 (1979)
- (4) T. Ando, et al, "1/4 CROSS-SECTION CONDUCTOR TEST OF JAPAN-NESE LCT CONDUCTOR", 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, (1979)

## 8. お わ り に

以上の実験結果はLCTコイルの詳細設計及び製作設計に重要なデータを与えることができた。さらに、製作設計を行なうにあたって実施される製作実証試験の方法及び結果に対して、実施要領及び評価基準を得ることができた。今後も、重要と思われる点、詳細設計時に予測できなかった問題が発生した場合はすみやかに実証試験を行なっていく予定である。

さらに、本報告書に記された実験結果の内容は、次期装置の開発研究のためのデータ及び問題解析手法となりえるものと思われるので、より深い問題分析を進めていきたいと思う。

### 謝 辞

本報告に記述した作業は森副所長、小幡核融合研究部長の指揮下に行われたもので、両長に対し日頃の激励に感謝いたします。又、専門的立場から常に御指導いただいている安河内特別研究員に感謝の意を表します。本報告は島本研究室長の研究室運営のための多大な努力の結果が実ったものであることをここに記します。実験に当っては安藤、辻、西研究員からの協力を得ました。

住友電工、共和電業等の方々からは試料の提供、時には実験に参加していただいたことに、ここに御礼を申し上げます。

### 参考文献

- (1) 島本進, “核融合トカマク用超電導磁石の開発” 日本原子力学会誌, VoL 21, No. 3 (1979)
- (2) 安藤俊就, 他, “応力下超電導特性測定装置”, 低温工学, VoL. 13, No. 3 (1978)
- (3) “LCT用超電導磁石詳細設計”, 内部資料 (1979)
- (4) T. Ando, et al, “1/4 CROSS-SECTION CONDUCTOR TEST OF JAPAN-NESE LCT CONDUCTOR”, 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, (1979)



## 8. お わ り に

以上の実験結果はLCTコイルの詳細設計及び製作設計に重要なデータを与えることができた。さらに、製作設計を行なうにあたって実施される製作実証試験の方法及び結果に対して、実施要領及び評価基準を得ることができた。今後も、重要と思われる点、詳細設計時に予測できなかった問題が発生した場合はすみやかに実証試験を行なっていく予定である。

さらに、本報告書に記された実験結果の内容は、次期装置の開発研究のためのデータ及び問題解析手法となりえるものと思われるので、より深い問題分析を進めていきたいと思う。

### 謝 辞

本報告に記述した作業は森副所長、小幡核融合研究部長の指揮下に行われたもので、両長に対し日頃の激励に感謝いたします。又、専門的立場から常に御指導いただいている安河内特別研究員に感謝の意を表します。本報告は島本研究室長の研究室運営のための多大な努力の結果が実ったものであることをここに記します。実験に当っては安藤、辻、西研究員からの協力を得ました。

住友電工、共和電業等の方々からは試料の提供、時には実験に参加していただいたことに、ここに御礼を申し上げます。

### 参考文献

- (1) 島本進, "核融合トカマク用超電導磁石の開発" 日本原子力学会誌, VoL 21, No. 3 (1979)
- (2) 安藤俊就, 他, "応力下超電導特性測定装置", 低温工学, VoL. 13, No. 3 (1978)
- (3) "LCT用超電導磁石詳細設計", 内部資料 (1979)
- (4) T. Ando, et al, "1/4 CROSS-SECTION CONDUCTOR TEST OF JAPAN-NESE LCT CONDUCTOR", 8th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, (1979)

## 付録 Nb<sub>3</sub>Sn 導体の引張試験

### A. 1 目的

超電導材料の中で、8 T以上に用いられる可能性を有するものにNb<sub>3</sub>Snがある。しかし、Nb<sub>3</sub>Snは化合物系超電導材料であるので、歪に対して非常に敏感な特性を有している。先に述べた国内で唯一の容量の応力下での臨界電流測定装置をもつ当研究室においてNb<sub>3</sub>Snの歪みと臨界電流の関係を実験的に求めた結果をここに記述する。

超電導線に加わる歪は、コイル巻線時に生ずる曲げによるものと、コイルを通電した場合に生ずる引張によるものがある。そのなかで、コイル巻線時の曲げは計算によって求められるので、線材にとっては純粋引張による歪が重要となる。本章では、応力下試験装置の1 ton 治具を用いて、通電は2,000 Aまで可能である電流リードを用いて臨界電流値の測定を行なった。

### A. 2 試料

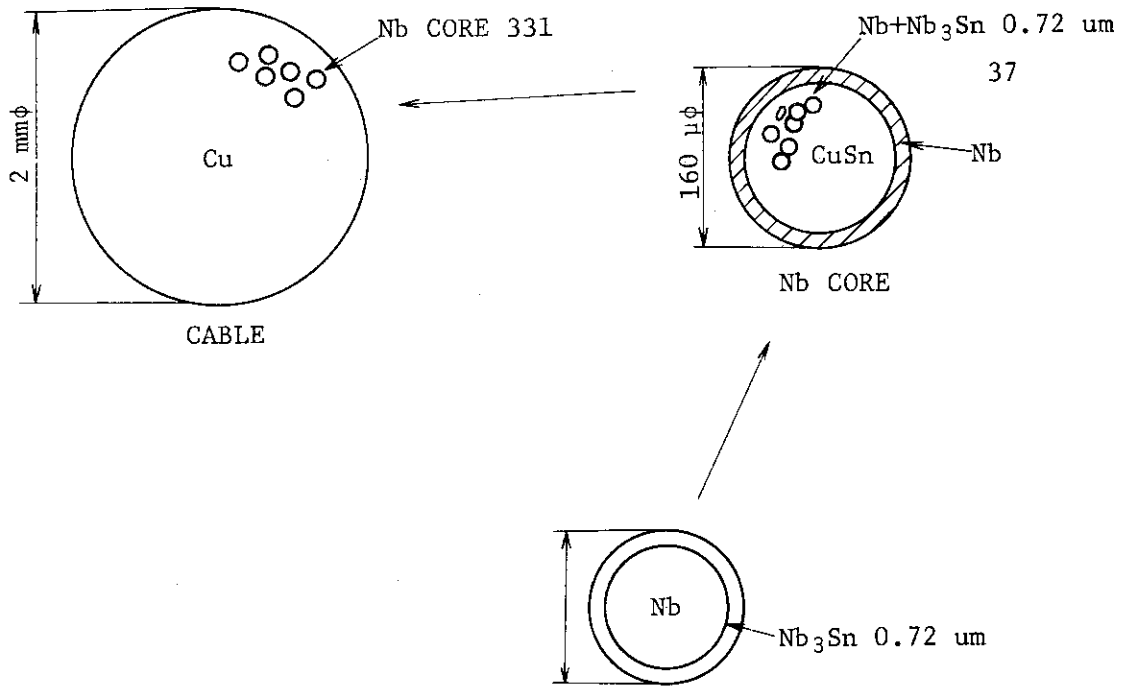
実験に用いた試料は、別途発表したコイル<sup>A1)</sup>に使用したNb<sub>3</sub>Sn 導体と同類のもので、処理時間を短くして、5.5 Tで臨界電流を約1,000 Aにした導体である。その試料の形状をFig. A. 1及びFig. A. 2に示す。本試料のNb<sub>3</sub>Sn 層の厚さは上記の実際のコイルに使用した導体におけるNb<sub>3</sub>Snの層よりうすい。Nb<sub>3</sub>Snの厚さによる歪特性の変化についての報告も他にみられる。<sup>A2)</sup>

### A. 3 測定法

通常の超電線の臨界電流測定の際に歪のパラメータがあるため、測定は歪を試料にかけてから、磁界を印加し、通常の臨界電流の測定を行なった。歪は0から1.2%まで変化させ、磁界は5.5 Tと4.5 Tの2つについて行なった。試料は、引張試験のチャックが板材専用であるため、Fig. A. 3に示すように黄銅を補助材として試料をハンダで埋込んだ。歪の測定には、この補助材の一面にストレーン・ゲージを接着して行なった。この場合、導体には本文5.に述べた関係が生じないようチャック部を少しつぶして導体に直接力が加かるようにした。

### A. 4 試験結果

測定結果はFig. A. 4に示すように、歪が0.5%までは臨界電流値が上昇し、それ以上では急激に減少し、0.7%で歪が0の場合の臨界電流値以下となる。この特性は、この導体が0.5%で応力が零になり、それ以前には導体製作時に生じた圧縮応力が残っているものと想像される。また、歪による臨界電流値の変化は、外部磁界を4.5 Tから5.5 Tまでに変化させても大きな差は生じなかった。



NUMBER OF CORE  
 $331 \times 37 = 12,247$

Fig. A.1 Nb<sub>3</sub>Sn superconductor

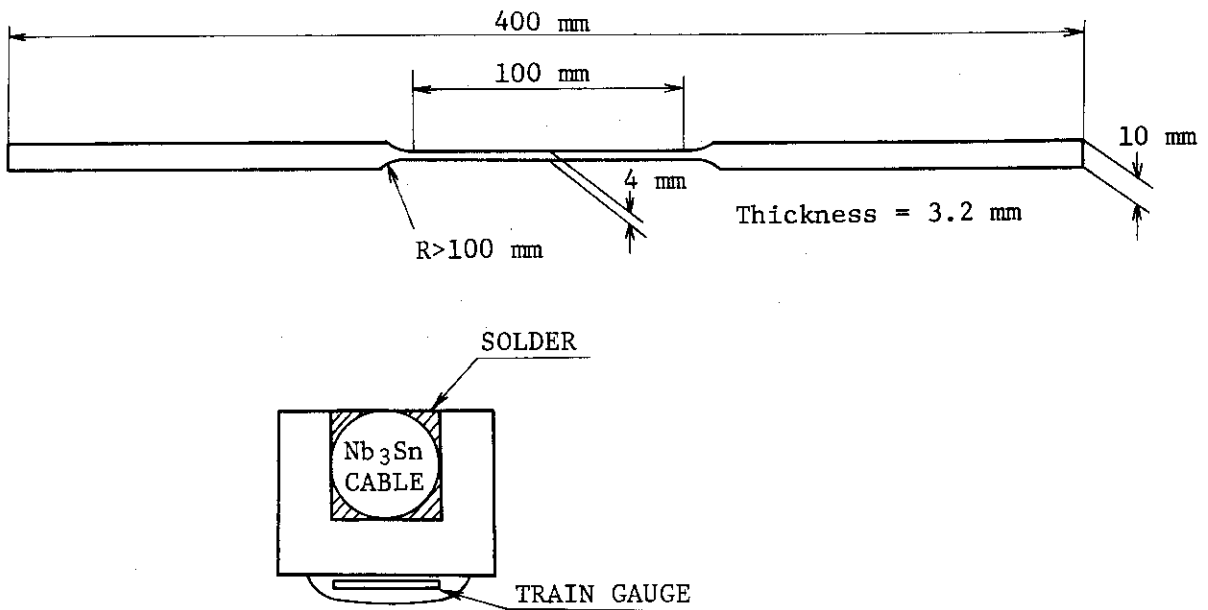


Fig. A.2 The sample of Nb<sub>3</sub>Sn conductor

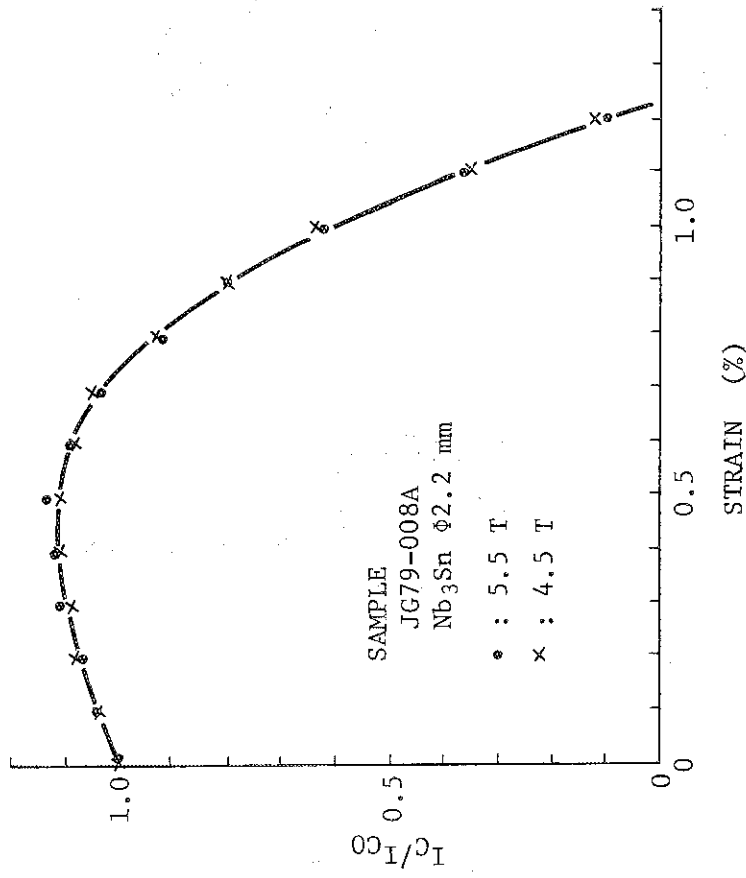


Fig. A.4 Critical current as a function of strain

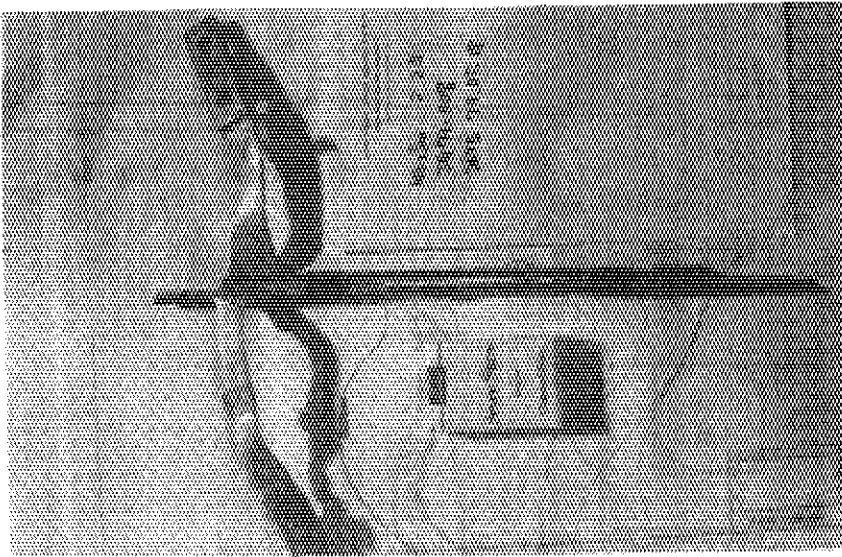


Fig. A.3 A picture of the sample

参考文献

- (A 1) 安藤俊就, " Cryostable FM Nb<sub>3</sub>Sn コイルの試作" 第23回低温工学協会発表会 (1979)
- (A 2) D. S. Easton and D. M. Kroeger " KIRKENDALL VOIDS - A DETRI  
MENT TO Nb<sub>3</sub>Sn SUPERCONDUCTORS " MAG - 15. (1979)