

JAERI - M  
93-001

ヘリウム・ガス蒸発法による誘導加熱量測定装置の  
製作及び測定法の確立

1993年2月

塚本 英雄\*・和田山芳英\*・小泉 徳潔  
磯野 高明・高橋 良和・西 正孝

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。  
入手の問い合わせは、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)

ヘリウム・ガス蒸発法による誘導加熱量測定装置の製作及び測定法の確立

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

塚本 英雄\* ・和田山芳英\* ・小泉 徳潔・磯野 高明  
高橋 良和 ・西 正孝

(1993年1月5日受理)

強制冷凍型の超電導マグネット及び導体の安定性試験において導体を高速加熱する方法として誘導加熱法が適用される。この誘導加熱法において試験導体に実際に投入される熱量を定量的に測定できる装置を製作し、測定法の確立を試みた。

測定法はヘリウム・ガス蒸発法で、その原理は誘導加熱に伴う液体ヘリウムの蒸発容積を測定し、蒸発熱から総投入熱量を算出するものである。抵抗ヒータ加熱による信頼性の検討において測定値は計算値と良く一致し、その有効性が確認された。またケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量を測定した結果、強制冷凍型導体の素線及びコンジットへの誘導加熱量、誘導ヒータの自己発熱量の各々が定量的に評価でき、安定性試験における入熱量の較正に本法が適用可能であることを実証した。

Boil-off Calorimetric Measurement of Inductive Heating Energy  
in Stability Test of Superconducting Magnet

Hideo TSUKAMOTO<sup>\*</sup>, Yoshihide WADAYAMA<sup>\*</sup>, Norikiyo KOIZUMI  
Takaaki ISONO, Yoshikazu TAKAHASHI and Masataka NISHI

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

(Received January 5, 1993)

Inductive heating method is applied to stability test of superconducting magnet, because the method can heat the conductor so quickly. The apparatus for measuring the quantity of heat put into the conductor with this inductive heating method was made, and the measuring method approached to completion.

The measuring method is that the volume of helium boil-off gas with inductive heating is measured and the quantity of heat put into the cable is calculated with the volume and evaporation heat of helium. Investigation of the reliability of the apparatus was performed by using the resistive heater, and it was found that the apparatus had fair accuracy. The quantity of inductive heat of the strand, conduit and heater respectively were estimated in the measurement of a cable-in-conduit type conductor.

This measuring method is demonstrated to be applied to the calibration of the quantity of heat put into conductor in the stability test of superconducting magnet.

Keywords: Boil-off, Calorimetric, Inductive Heating, Cable-in-conduit  
Conductor, Stability, Superconducting Magnet

---

\* Visiting Researcher from Hitachi, Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. ヘリウム・ガス蒸発法の測定装置 .....	2
2.1 測定原理 .....	2
2.2 装置概要 .....	2
2.3 実験手法 .....	2
2.4 誘導加熱法 .....	3
3. 試験導体及び試験条件 .....	6
3.1 試験導体 .....	6
3.2 試験条件 .....	6
4. 試験結果 .....	9
4.1 試験装置の信頼性 .....	9
4.2 誘導加熱量の測定結果 .....	9
5. 考 察 .....	12
5.1 入熱量と導体の構成要素との関係 .....	12
5.2 誘導加熱による温度上昇値 .....	12
5.3 誘導加熱量の計算値との比較 .....	12
6. 今後の課題 .....	17
7. 結 論 .....	17
謝 辞 .....	17
文 献 .....	18
付 録 .....	19

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Boil-off Calorimetric Measurement Apparatus .....	2
2.1 Principle .....	2
2.2 Apparatus .....	2
2.3 Measuring Method .....	2
2.4 Inductive Heating Method .....	3
3. Sample and Test Condition .....	6
3.1 Sample Conductor .....	6
3.2 Test Condition .....	6
4. Results .....	9
4.1 Reliability of Measurement Apparatus .....	9
4.2 Results of Inductive Heating Test .....	9
5. Discussion .....	12
5.1 The Quantity of Heat Put into Each Component of Conductor ..	12
5.2 Temperature of Conductor .....	12
5.3 Comparison between Results and Calculations .....	12
6. Subjects .....	17
7. Conclusions .....	17
Acknowledgements .....	17
References .....	18
Appendixes .....	19

## 記号一覧

a	: 円筒の厚み	[m]
$B_{in}$	: コンジット内側の磁束密度	[T]
$B_m$	: 円柱 (コンジット) 表面の最大外部磁束密度	[T]
d	: 円筒の中心直径	[m]
D	: 円柱の直径	[m]
$E(in)$	: 誘導加熱による総投入熱量	[J]
$E(strand)$	: 素線への誘導加熱量	[J]
$E(conduit)$	: コンジットへの誘導加熱量	[J]
$E(heater)$	: ヒータ線の誘導及びジュール発熱量	[J]
e	: 円筒の誘導電圧	[V]
F	: 加熱効率	[-]
f	: 加熱周波数	[Hz]
H	: 蒸発熱	[J/g]
R	: 円筒の一周抵抗 (単位軸長当り)	[ $\Omega/m$ ]
r	: 円筒の抵抗率	[ $\Omega \cdot m$ ]
S	: 円柱の断面積	[ $m^2$ ]
$S_{in}$	: コンジット内側の面積	[ $m^2$ ]
$T_h$	: 加熱時間	[s]
V	: 蒸発容積	[ $cm^3$ ]
W	: 誘導加熱量	[J/m]
$\pi$	: 円周率	[-]
$\rho$	: 液体ヘリウム密度	[ $g/cm^3$ ]
$\delta$	: 磁界の浸透深さ	[m]
$\mu$	: 円柱の透磁率	[H/m]
$\phi$	: 円筒内部の磁束	[Wb]
$\omega$	: 角周波数	[ $s^{-1}$ ]

## 1. はじめに

強制冷凍型の超電導マグネット及び導体の安定性試験において、熱的外乱を模擬的に高速投入する方法として誘導加熱法がある<sup>(1)</sup>。この方法は数十ms程度の入熱が可能であり、短時間の外乱に対する導体の安定性を定量的に評価することが可能となる。

しかし、誘導加熱法によって導体に投入された熱量を直接定量的に評価する方法が無く、従来は導体内部に埋め込まれた熱電対の温度上昇から投入エネルギーを推算する方法が用いられてきた<sup>(2)</sup>。温度上昇を測定する方法では、温度測定点の入熱は推定可能であるが、導体全体の入熱総量が正確に把握できない等の問題があり形状の異なる導体の安定性を相互比較するには十分でなかった。

本報告では誘導加熱に伴う総投入熱量を測定する方法として、加熱に伴う液体ヘリウムの蒸発容積から直接熱量を算出するヘリウム・ガス蒸発法<sup>(3)・(4)</sup>を採用し、その有効性の確認と実導体への適用を示す。



## 2. ヘリウム・ガス蒸発法の測定装置

### 2.1 測定原理

誘導ヒータ印加時に投入される熱量は、導体(素線+コンジット)への誘導加熱及びヒータ線自身の誘導・ジュール発熱の合計である。誘導加熱ヒータが取り付けられた導体試料全体を液体ヘリウム中に浸漬し誘導加熱すると、これらの入熱は全て液体ヘリウムの蒸発熱として使われ入熱量に比例したヘリウムが蒸発することになる。総入熱量 $E(in)$ は次式で算出される。

$$E(in) = V \cdot H \cdot \rho \quad [J] \quad \text{----- (1)}$$

ここで  $V$ :ヘリウム・ガス蒸発容積[ $\text{cm}^3$ ]  
 $H$ :ヘリウム蒸発熱{20.6[J/g] at 4.2[K], 1[bar]}  
 $\rho$ :密度{0.01678[g/ $\text{cm}^3$ ] at 4.2[K], 1[bar]}

したがって、蒸発したヘリウム・ガスの容積を測定することによって入熱量が容易に算出できる。

なお総入熱量は導体構成部材の各投入熱量の合計で与えられるため、 $E(in)$ は次式で表される。

$$E(in) = E(\text{strand}) + E(\text{conduit}) + E(\text{heater}) \quad \text{---- (2)}$$

ここで、 $E(\text{strand})$ :素線への誘導加熱量  
 $E(\text{conduit})$ :コンジットへの誘導加熱量  
 $E(\text{heater})$ :ヒータ線の誘導及びジュール発熱量

### 2.2 装置概要

図2-1はヘリウム・ガス蒸発法の装置図を示す。誘導加熱ヒータが取り付けられた導体試料は装置下部に固定され、ヒータ線には交流電源から電流が供給される。加熱によって発生したヘリウム・ガスはテフロン製回収器を介して上部のメスシリンダーに集められる。ヘリウム蒸発量はメスシリンダーの目盛りをガラスデュアーの外から目視で読み取る。なおメスシリンダーは転倒できる構造になっており、集めたヘリウム・ガスを上方へ逃がすことで、試験を繰り返し実施できる。

### 2.3 実験手法

誘導加熱に伴うヘリウム・ガス蒸発量の測定時間は、投入熱量が全て液体ヘリウムの蒸発に費やされる時間を考慮して、加熱1分後とした。なお、蒸発量を正確に評価するた

めに、定常熱侵入によるガス発生量を加熱試験の前後、各5分間測定し、それらの値より1分間当たりの蒸発量を算出して、誘導加熱に伴う蒸発量から差し引くことで評価した。

誘導加熱用電源はコンデンサバンクからLC共振回路で交流波を通電するタイプで、加熱条件は1kHz, 40msとした。電流値は回路中のシャント電圧をデジタルメモリで読み込んで電流に換算した。誘導加熱量を表す値としては、電流値の自乗の時間積分値 $\int I^2 dt$ をデジタルメモリ内で求めた後、これに磁場係数を乗じて計算した $\int B^2 dt$ を採用した。ここでBは誘導ヒータ内の最大磁束密度である。

図2-2はデジタルメモリで測定した交流電流波形、及び電流値の自乗の時間積分値の例を示す。

#### 2.4 誘導加熱法

誘導加熱は、被加熱体に磁界変化を与え、磁界変化を打ち消すように被加熱体中に流れる誘導電流によるジュール損失で加熱を行う方法である。

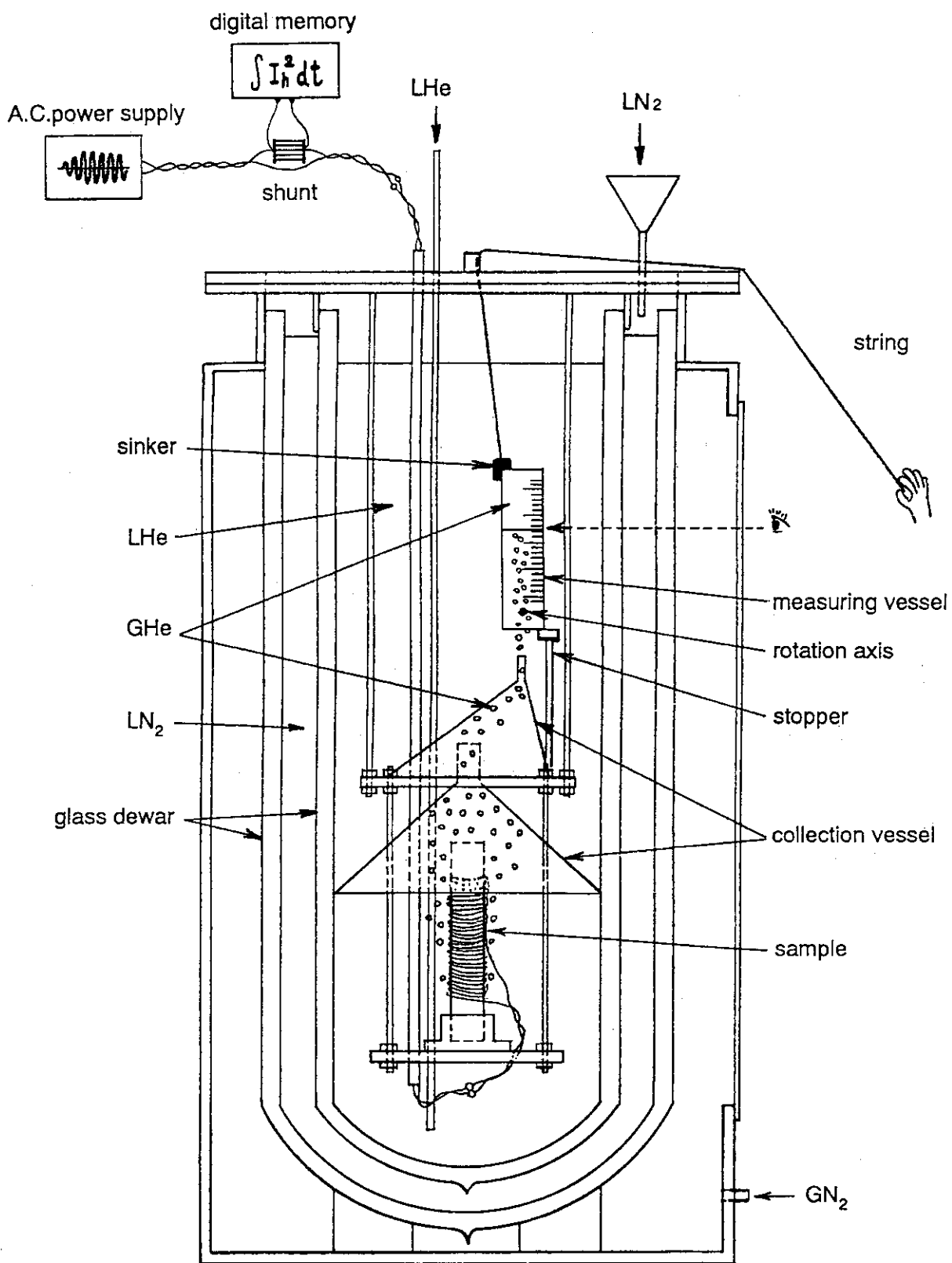
誘導加熱による加熱量は、例えば空間的に均一な交流磁界中に置かれた直径dの円柱の場合次式で与えられる<sup>(5)</sup>。

$$W = \pi \cdot f \cdot B_m^2 \cdot T_h \cdot F(D/\delta) \cdot \mu^{-1} \cdot S \quad \text{----(3)}$$

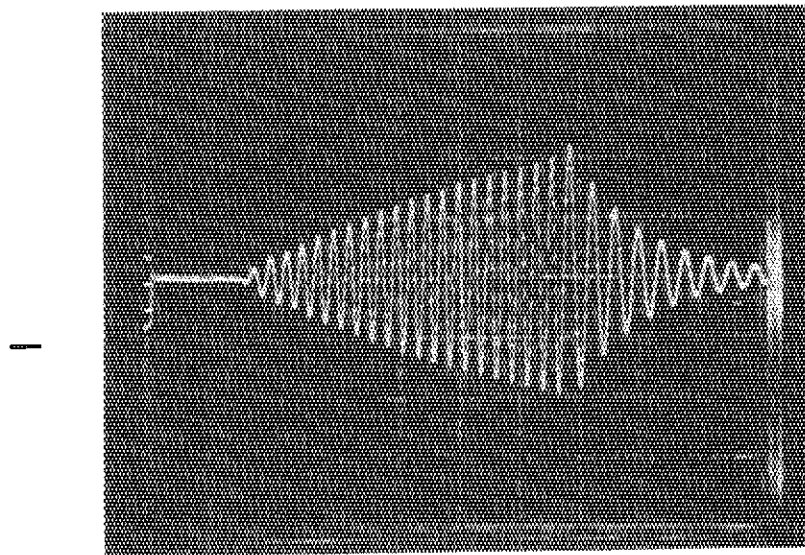
ここで、W:加熱量、 f:加熱周波数、 B<sub>m</sub>:円柱表面の最大外部磁束密度、  
 T<sub>h</sub>:加熱時間、 F:加熱効率、 D:円柱の直径、  
 δ:磁界の浸透深さ、 μ:円柱の透磁率、 π:円周率、  
 S:円柱の断面積

(3)式の結果として誘導加熱量は $\int B_m^2 dt$ に比例する。

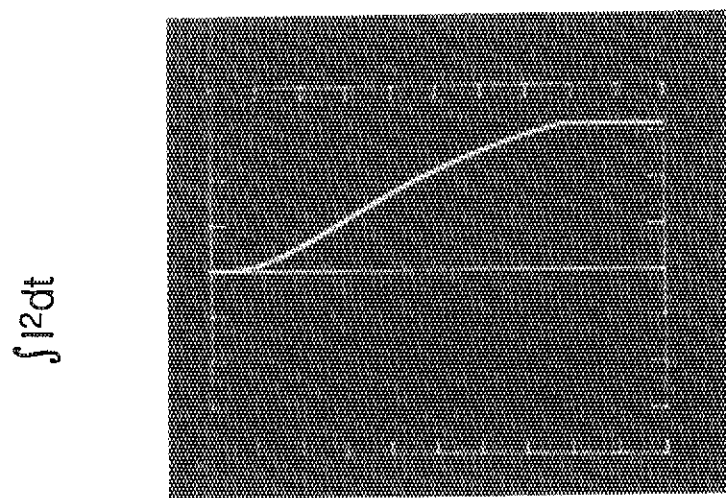
これに基づき以下では、誘導加熱量を表す値として、誘導ヒータ内の磁束密度をBとし $\int B^2 dt$ を計算から求めるものとする。



⊠ 2.1 Experimental Setup for Inductive Heater Calibration



Time  
(a) Current  $I$



Time  
(b) Time Integral of  $I^2$

⊠ 2. 2 Inductive Heating Current

### 3. 試験導体及び試験条件

#### 3.1 試験導体

誘導加熱校正試験に供した試料はケーブル・イン・コンジット型強制冷凍導体である<sup>(6)</sup>。導体諸元を表3-1に示す。素線数は324本で、Cu-Niコンジットに収納された構造である。

表3-1 ケーブル・イン・コンジット型強制冷凍導体の諸元

素線	: (NbTi) <sub>3</sub> Sn	導体外径	: 25.4mm
素線径	: 1.02mm	コンジット材質	: Cu-Ni
本数	: 324本	ボイド率	: 約40%

誘導加熱時の素線間及びフィラメント間の導体端部切断面における電氣的結合を切るために、導体の両端部は平面研磨の後、硝酸でエッチング処理し、各素線及び各フィラメントを互いに独立させた。なお誘導加熱ヒータには表面にフォルマル絶縁を施したφ1.0mmの銅線を使用し、所定のターン数を試料導体外周に巻線した。

また、ヒータ巻線後の試料導体はエレクトロン・ワックスを塗布し、ヒータ巻線部を固定した。図3-1に誘導加熱ヒータの巻線構造及び諸元を示す。

#### 3.2 試験条件

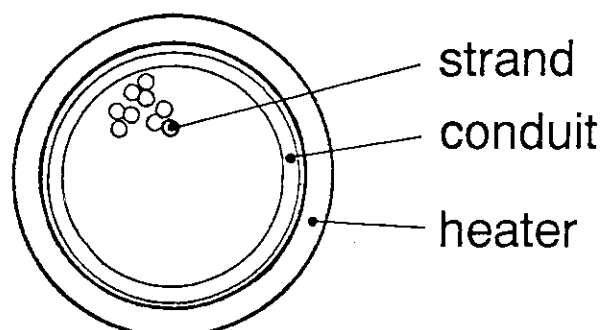
ここでは、素線、コンジット等の構成部材に投入された、各々の誘導加熱量を評価するため、次の4種の試料(図3-2参照)に対して試験した。

- (a) 導体+ヒータ線
- (b) 導体(コンジット:スリット入)+ヒータ線
- (c) コンジット+ヒータ線
- (d) ヒータ線

上記(a)~(d)試料の測定結果を組み合わせるにより、入熱量の成分を分離して求めることができる。表3-2にその求め方を示す。(c)は一見(a)におけるコンジットへの入熱量+ヒータ線の発熱量を示すように思われるが、素線部によるシールド効果があるため実際は異なる。このことは後述するように測定値からも示された。

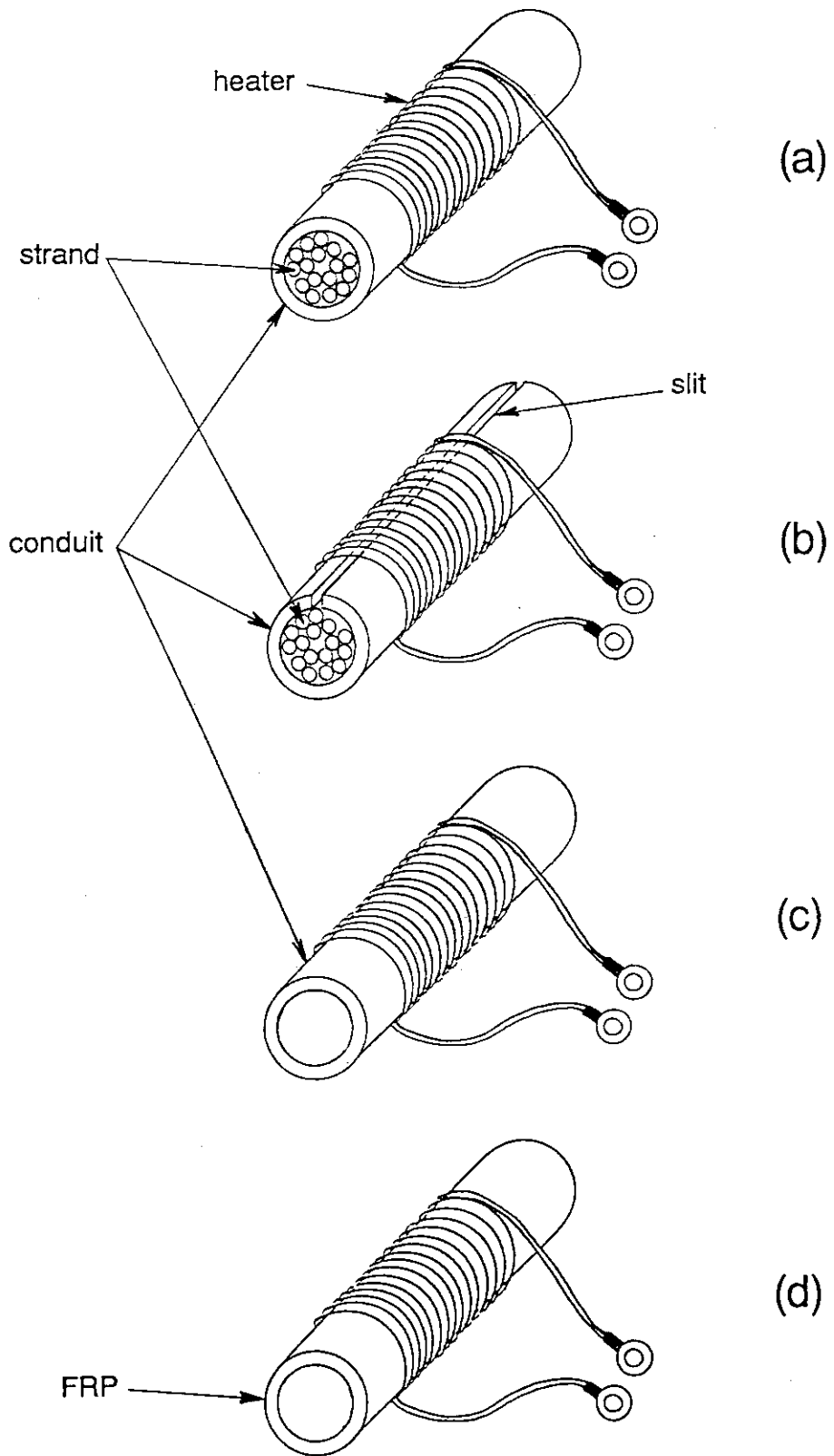
表 3-2. 入熱量の成分と測定方法

No	入熱量の成分	測定法
①	導体への入熱量	(a) - (d)
②	素線 (コンジットを除く導体) への入熱量	(b) - (d)
③	コンジットへの入熱量	(a) - (b)
④	ヒータ線の発熱量	(d)



outer diameter of conduit	25.4mm
thickness of conduit	1.5mm
inner diameter of heater	26.0mm
thickness of heater	3.0mm
length of heater	100.0mm
number of turns of heater	300.0turn

図 3.1 Specifications of Inductive Heater



☒ 3.2 Kinds of Samples

## 4. 試験結果

### 4.1 試験装置の信頼性

ヘリウム・ガス蒸発法による入熱量測定の有効性を確認するために、入熱量計算が容易な抵抗型ヒータ線単独のジュール加熱による熱量を測定し、その計算値と比較した。ヒータ線には、ヒータ線自身の誘導発熱分がジュール発熱分に比べて十分小さくなるように比抵抗の大きいCu-Ni線を用いた。加熱条件は誘導加熱と同一の40msのパルス波である。

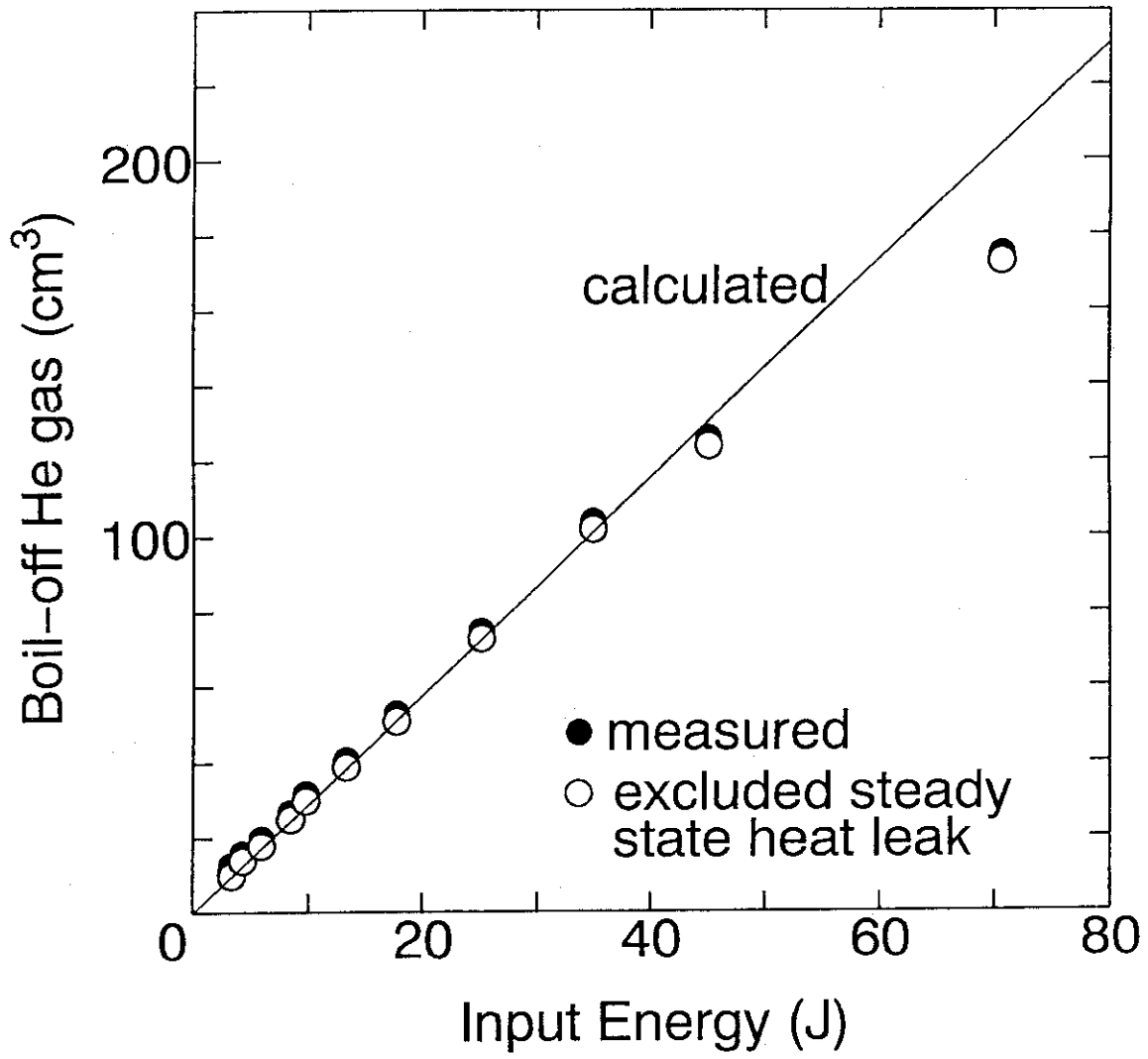
図4-1に抵抗型ヒータ線をジュール発熱させた場合のヘリウム・ガス蒸発量の測定結果及びその蒸発量から算出した熱量と計算値の比較を示す。図中の●はヘリウム・ガス蒸発量の測定値、○は測定値から定常熱侵入を差し引いたジュール発熱による正味のヘリウム・ガス蒸発量考慮したものである。定常熱侵入量は約1J/min(3cm<sup>3</sup>/min)程度であった。図より、定常熱侵入を考慮した測定値は計算値と良く一致しており、ヘリウム・ガスの蒸発量から入熱量を評価する本装置が有効であることが証明された。なお、ヘリウム・ガス蒸発量が約100cm<sup>3</sup>以上の領域においては測定値が低く評価されているが、これはガスを回収するメスシリンダーの下部からガスが逆流して漏れるためである。本件はガス蒸発量に対して適切な容量のメスシリンダーを選定することによって防ぐことが可能である。

### 4.2 誘導加熱量の測定結果

図4-2に、ヘリウム・ガス蒸発法を用いたケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量測定結果を示す。横軸はコンジット上の最大磁束密度の自乗の時間積分値で、デジタル・メモリで測定したヒータ電流を磁束密度に換算して計算した値である。この値は誘導加熱量に比例すべき値である。縦軸は蒸発量から求めた入熱量である。

図4-2より測定した入熱量は磁束密度の自乗の時間積分値に比例しており、妥当な結果である。





☒4.1 Inspection of Boil-off by Resistive Heater

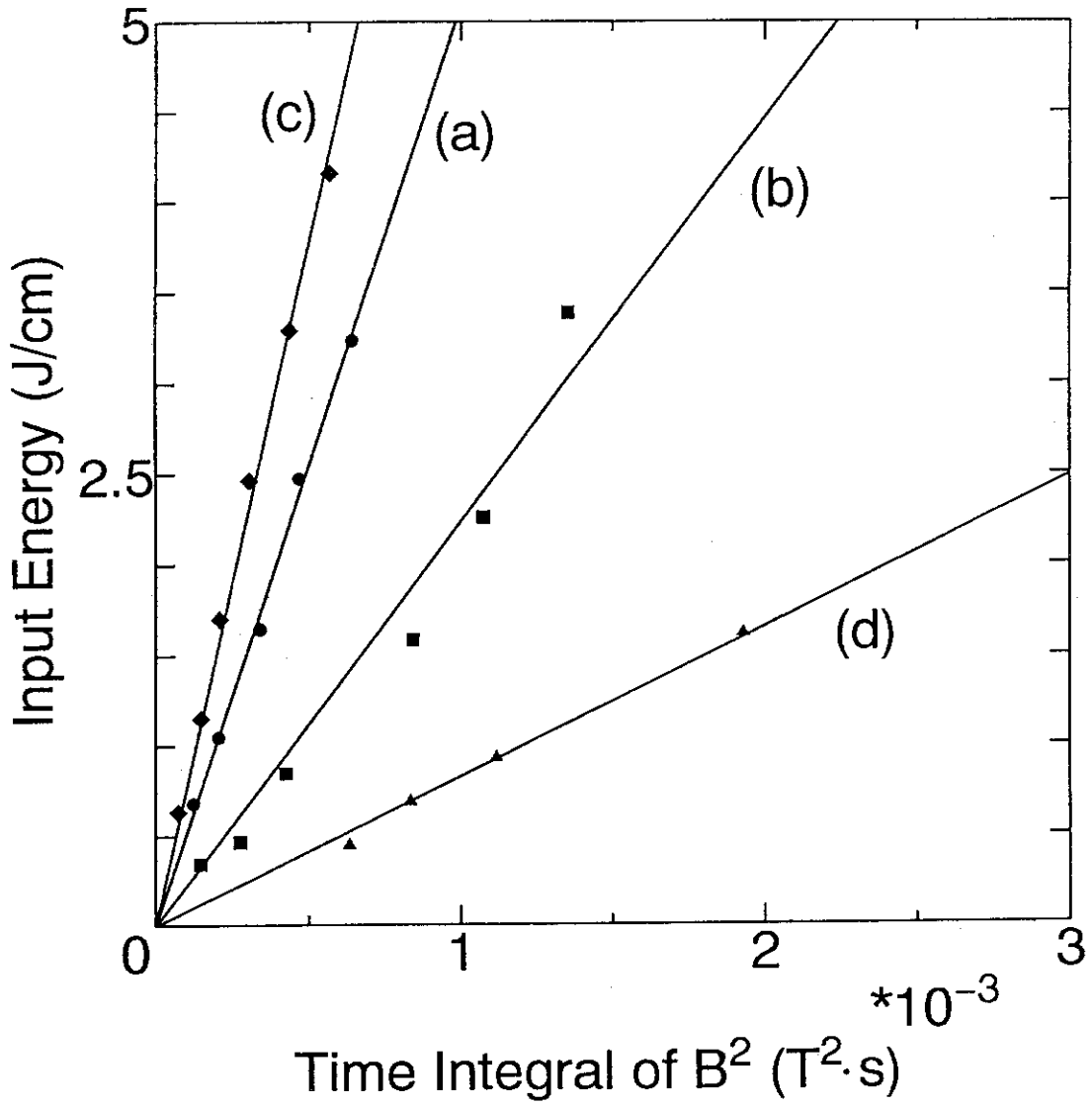


Fig. 4.2 Results of Inductive Heating Calibration Test

## 5. 考 察

### 5.1 入熱量と導体の構成要素との関係

図4-2において、サンプル(c) [コンジット+ヒータ線]がサンプル(a) [コンジット+素線+ヒータ線]より大きな入熱量となっているが、この原因は素線部内に発生するシールド電流が大きく、コンジット内の磁束変化が素線が無い場合に比べて小さくなるため、コンジット内に発生するシールド電流が減少するためと考えられる。尚、(c)が(a)より小さい入熱量になるケースも測定されており、素線部におけるシールド効果の大きさによって素線部及びコンジット部への入熱量の分担が決定されているものと思われる。

次に、表3-1に従って各構成要素への入熱量を図4-2から求めると図5-1となる。これより、本サンプルの場合、導体を構成する素線とコンジットへの入熱比は1:2となっていることが分かる。

### 5.2 誘導加熱による温度上昇値

素線及びコンジットが図5-1に示す熱量で一樣に温度上昇すると仮定した場合、温度変化は図5-2に示すようになる。図より加熱時間内の冷却効果が大きくなければ超電導線は容易に10K以上の温度まで加熱されていると思われる。

### 5.3 誘導加熱量の計算値との比較

素線部の加熱量計算は不確定要素が多く困難であるため、簡単な円筒モデルのサンプル(c)について比較計算を行う。円筒への誘導加熱量は、円筒内部の磁束変化で円筒に生じる誘導電圧から求めることができる。磁束は軸方向の成分のみでサンプル全長に一樣に生ずるものとする以下のように求められる。

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{---(4)}$$

$$R = r \frac{\pi d}{a} \quad \text{---(5)}$$

$$W = \frac{\int e^2 dt}{R} \quad \text{---(6)}$$

- $e$ :円筒の誘導電圧[V]  
 $\phi$ :円筒内部の磁束[Wb]  
 $R$ :円筒の一周抵抗(単位軸長当り)[ $\Omega/m$ ]  
 $r$ :円筒の抵抗率[ $\Omega \cdot m$ ] { $1.555 \times 10^{-7}$  (4.2K実測値)}  
 $d$ :円筒の中心直径[m] { $23.9 \times 10^{-3}$ }  
 $a$ :円筒の厚み[m] { $1.5 \times 10^{-3}$ }  
 $W$ :誘導加熱量[J/m]

ここで、コンジット内部の磁束密度はほぼ一様で、

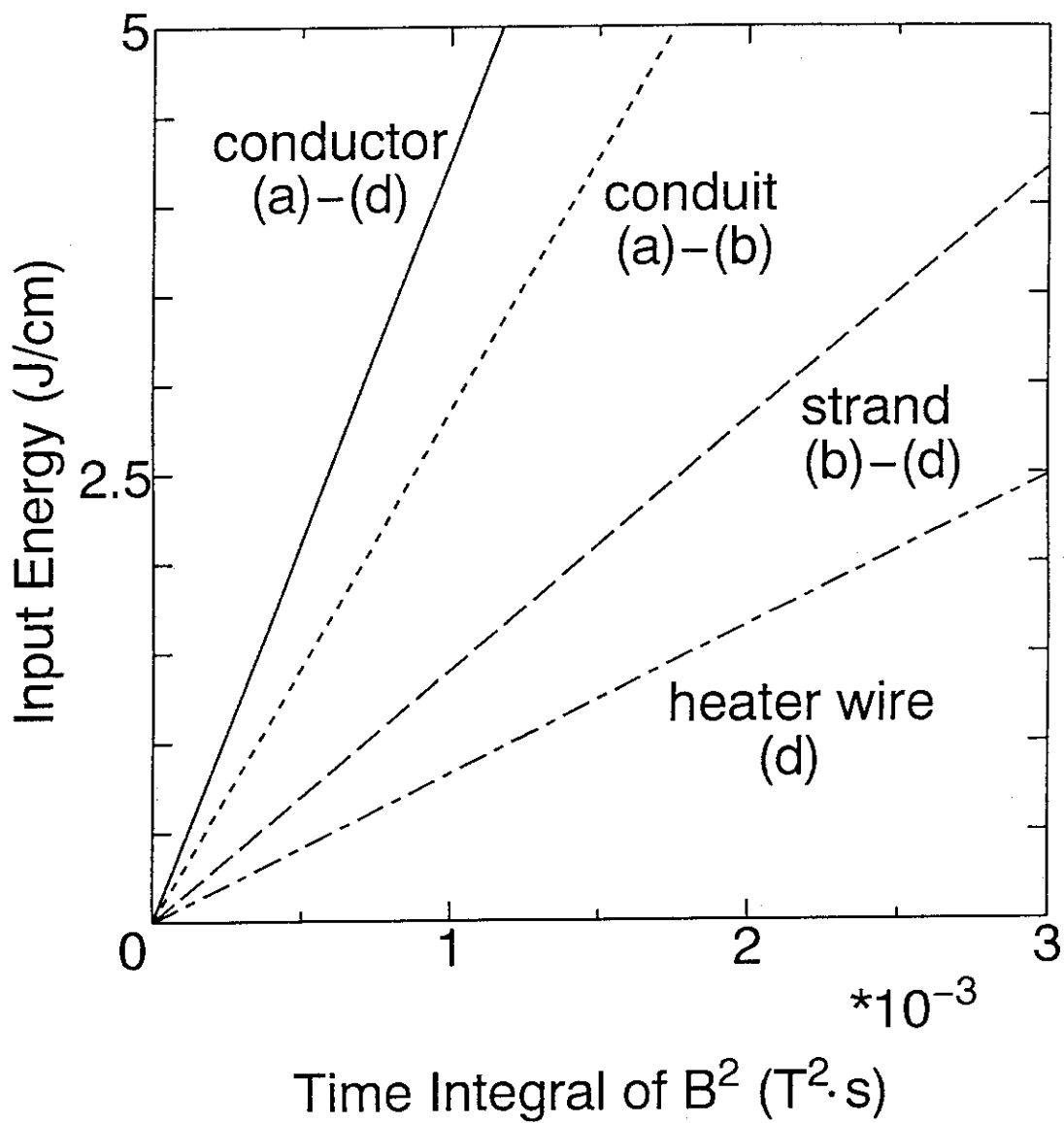
$$B_{in} = B_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad \text{---(7)}$$

で変化しているとすれば、下記の誘導加熱量の式を得る。

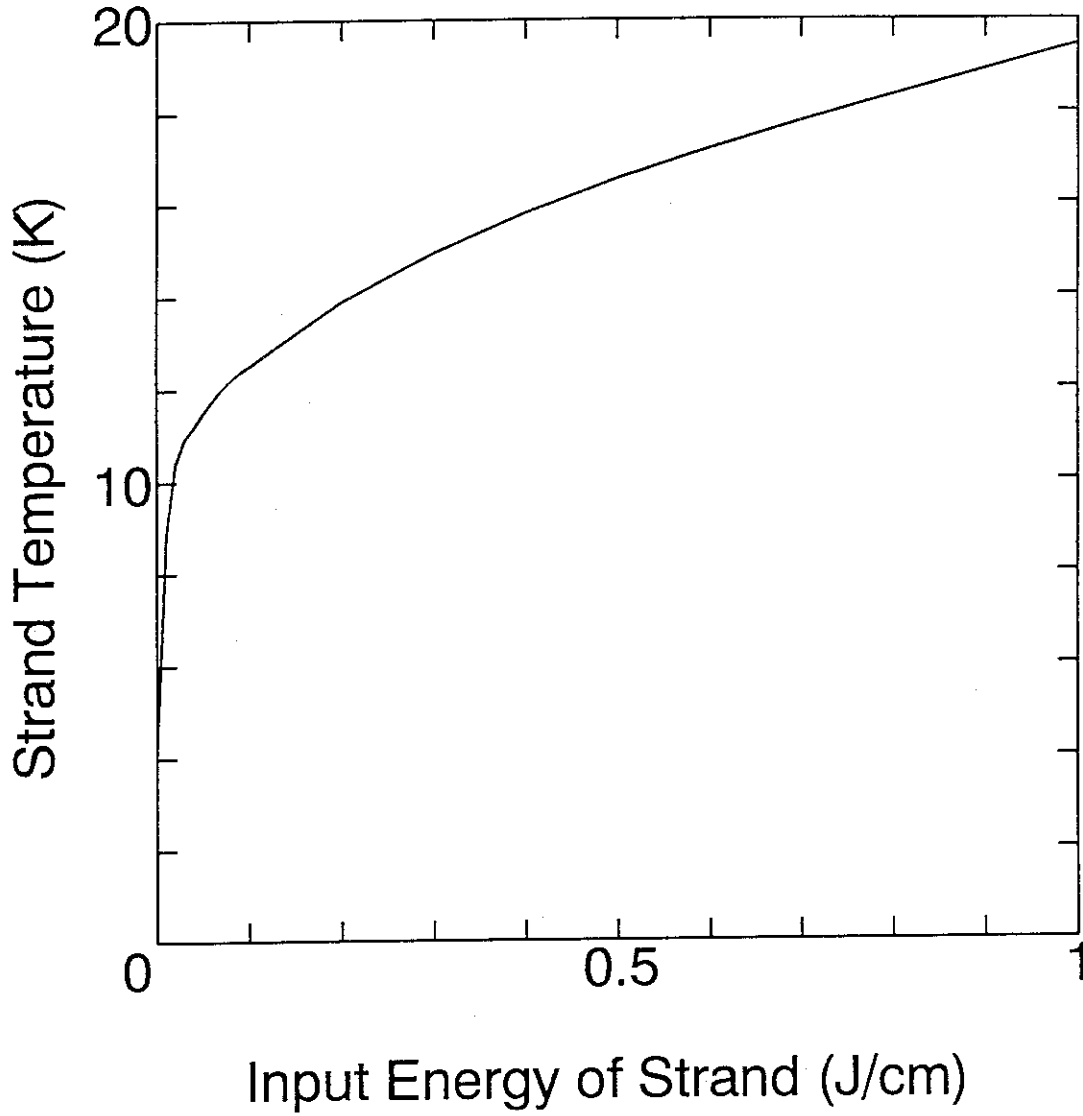
$$W = \frac{\omega^2 \cdot B_m^2 \cdot S_{in}^2}{2 \cdot R} \cdot Th \quad \text{---(8)}$$

- $\omega$ :角周波数[ $S^{-1}$ ]  
 $B_m$ :コンジット内側の磁束密度最大値[T]  
 $S_{in}$ :コンジット内側の面積[ $m^2$ ]  
 $Th$ :加熱時間[s]

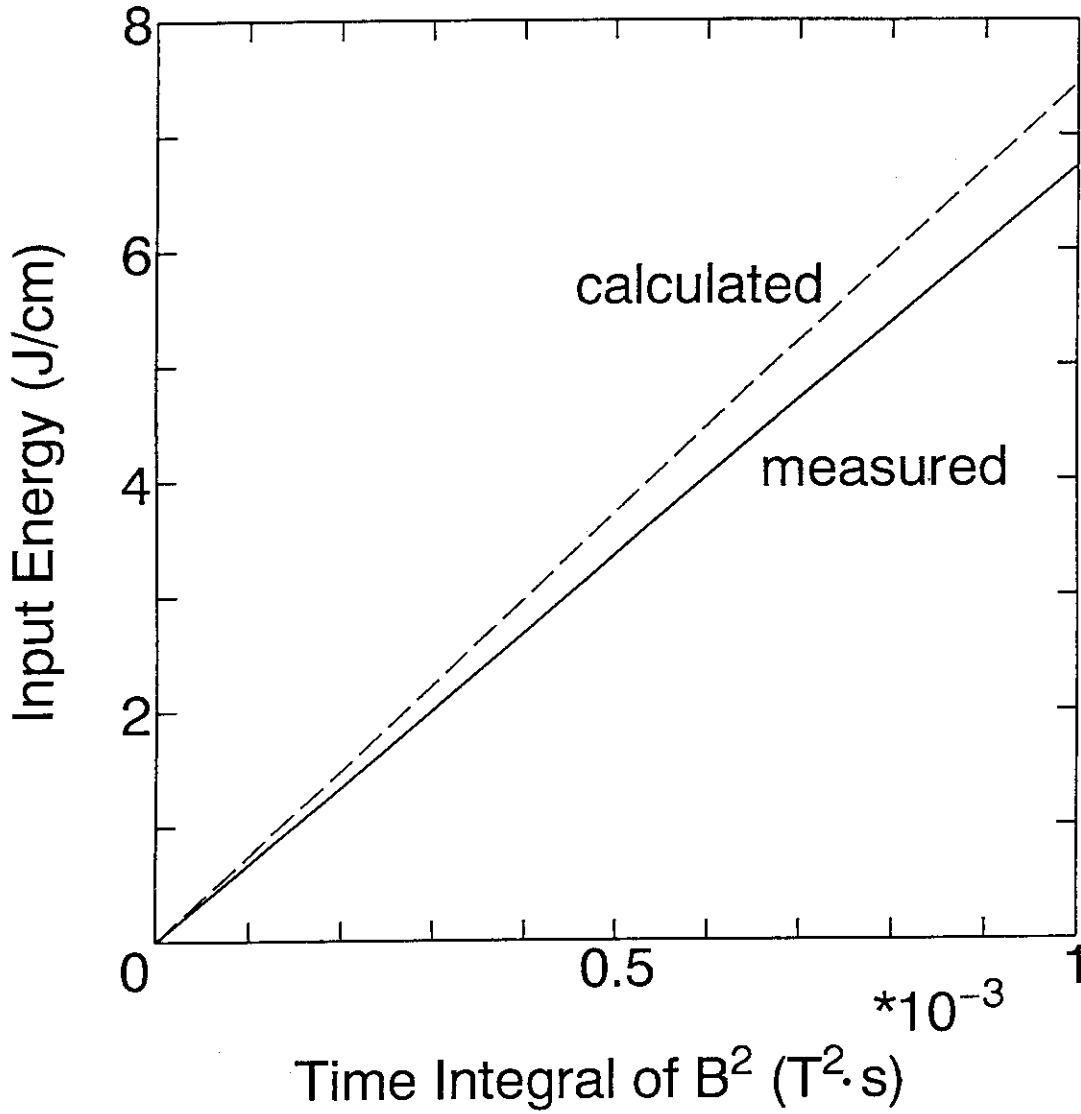
この式より求めた値と測定値との比較を図5-3に示す。サンプル端部でのBの軸方向成分の降下を考慮すれば、 $B_m^2$ の積分値は全長一様な場合に比べて約0.9倍となるので実測値とほぼ一致する。



⊠5.1 Components of Inductive Heating



☒ 5.2 Strand Temperature by Inductive Heating



☒ 5.3 Comparison of Calculated Results with Measured Results

## 6. 今後の課題

超電導コイル及び導体の安定性試験は磁界中で実施されるため、誘導加熱量の較正試験も同様の磁界条件で評価されることが望ましい。試作した装置はヘリウム・ガス蒸発量をガラスデュアー外部から目視する構造であるため、現状では外部磁界を印加することはできない。今後、本装置をさらに改良して磁界中で誘導加熱量が測定できるものへと発展させる予定である。

## 7. 結 論

強制冷凍導体の誘導加熱量を測定するためにヘリウム・ガス蒸発法を用いた試験装置を試作し、その有効性を確認するとともにケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量を測定した。

その結果、抵抗ヒータ単独のジュール加熱試験において入熱測定値と計算値が一致し、本装置が投入熱量を評価するのに十分な信頼性を有していることを確認した。

また、ケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量の測定結果より、誘導加熱に伴う総投入熱量を素線(誘導加熱)、コンジット(誘導加熱)、ヒータ線(誘導・ジュール発熱)への入熱量に分けることができ、超電導導体の安定性を評価する上で精度の高い較正值を得られるようになった。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた辻博史超電導磁石研究室長、吉田清副主任研究員、ならびに実験にご協力頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。



## 6. 今後の課題

超電導コイル及び導体の安定性試験は磁界中で実施されるため、誘導加熱量の較正試験も同様の磁界条件で評価されることが望ましい。試作した装置はヘリウム・ガス蒸発量をガラスデュアー外部から目視する構造であるため、現状では外部磁界を印加することはできない。今後、本装置をさらに改良して磁界中で誘導加熱量が測定できるものへと発展させる予定である。

## 7. 結 論

強制冷凍導体の誘導加熱量を測定するためにヘリウム・ガス蒸発法を用いた試験装置を試作し、その有効性を確認するとともにケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量を測定した。

その結果、抵抗ヒータ単独のジュール加熱試験において入熱測定値と計算値が一致し、本装置が投入熱量を評価するのに十分な信頼性を有していることを確認した。

また、ケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量の測定結果より、誘導加熱に伴う総投入熱量を素線(誘導加熱)、コンジット(誘導加熱)、ヒータ線(誘導・ジュール発熱)への入熱量に分けることができ、超電導導体の安定性を評価する上で精度の高い較正值を得られるようになった。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた辻博史超電導磁石研究室長、吉田清副主任研究員、ならびに実験にご協力頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。

## 6. 今後の課題

超電導コイル及び導体の安定性試験は磁界中で実施されるため、誘導加熱量の較正試験も同様の磁界条件で評価されることが望ましい。試作した装置はヘリウム・ガス蒸発量をガラスデュアー外部から目視する構造であるため、現状では外部磁界を印加することはできない。今後、本装置をさらに改良して磁界中で誘導加熱量が測定できるものへと発展させる予定である。

## 7. 結 論

強制冷凍導体の誘導加熱量を測定するためにヘリウム・ガス蒸発法を用いた試験装置を試作し、その有効性を確認するとともにケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量を測定した。

その結果、抵抗ヒータ単独のジュール加熱試験において入熱測定値と計算値が一致し、本装置が投入熱量を評価するのに十分な信頼性を有していることを確認した。

また、ケーブル・イン・コンジット型導体の誘導加熱量の測定結果より、誘導加熱に伴う総投入熱量を素線(誘導加熱)、コンジット(誘導加熱)、ヒータ線(誘導・ジュール発熱)への入熱量に分けることができ、超電導導体の安定性を評価する上で精度の高い較正值を得られるようになった。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた辻博史超電導磁石研究室長、吉田清副主任研究員、ならびに実験にご協力頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1)電気学会通信教育会, 電熱工学, オーム社 (1984)
- (2)小泉徳潔ほか, DPC-TJ実験結果-安定性:低温工学27, 3, pp.51-56 (1992)
- (3)黒田邦茂, Modified boil-off method for measuring a.c. losses of superconducting composites, Cryogenics, 26, pp.566-568 (1986)
- (4)J.A.Eikelboom, Apparatus for calorimetric measurement of a.c. losses in superconductors, Cryogenics, 31, pp.363-365 (1991)
- (5)吉田清, 強制冷却方式による大型超電導磁石の安定性と保護の研究, JAERI-M 92-119 pp.144-146 (1992)
- (6)高橋良和ほか, Development of the advanced disk type coil for the toroidal field coil, Proceedings on 17th SOFT, September 14-18 (1992)

## 付 録

核融合用超電導コイルに使用する導体は、その使用条件に合わせ材質、形状等最適な仕様のもとに開発されている。本文中では較正方法を述べるために素線が(NbTi)<sub>3</sub>Snのケーブル・イン・コンジット型強制冷凍導体を例にとったが、異なる仕様で開発された導体についても安定性評価用誘導加熱較正を行っているので、その結果を以下に示す。

## (I) NbTiケーブル・イン・コンジット型導体較正結果

素線にNbTiを使用したケーブル・イン・コンジット型導体(DPC-U導体)<sup>(1)</sup>で、素線にはフォルマル絶縁が施されている。導体形状及び誘導ヒータ仕様を図I-1に示す。

誘導加熱較正結果を図I-2に示す。本文中で示した較正結果と大きく異なる点はサンプルタイプ(c) [コンジット+ヒータ線]がサンプルタイプ(a) [コンジット+素線+ヒータ線]よりも小さい入熱量になっていることである。これは素線絶縁が施されていることから、素線間を流れる誘導電流が非常に小さいことで説明される。よって素線部の磁気シールド効果がコンジットへ及ぼす影響は非常に小さいと考えられるので、サンプルタイプ(c)の入熱量からヒータ線分を差し引いた入熱量をコンジットへの入熱量としても良いと考えられる。

以上から入熱量の成分を計算した結果を図I-3に示す。

(II) (NbTi)<sub>3</sub>Snホロー型導体較正結果

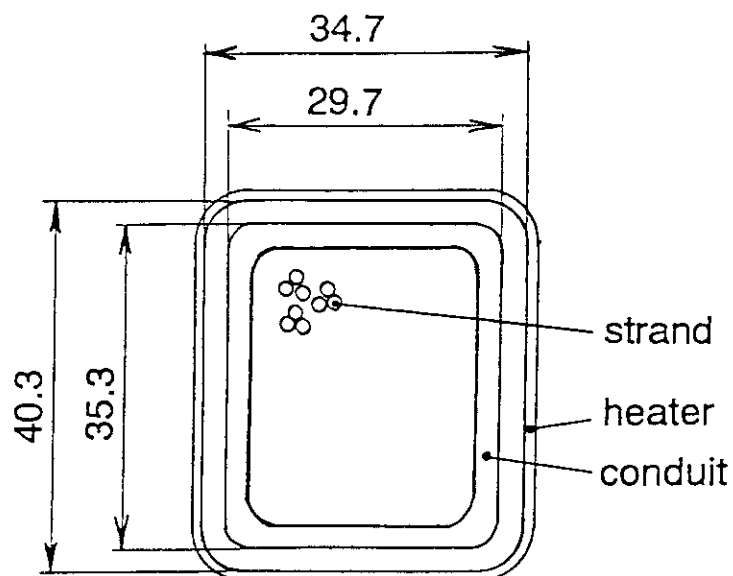
素線に(NbTi)<sub>3</sub>Snを使用したホロー型導体(TMC-FF導体)<sup>(2)</sup>で、素線は安定化銅中に半田で埋め込まれており、ヘリウムは安定化銅の溝部分を流れる。導体形状及び誘導ヒータ仕様を図II-1に示す。

誘導加熱較正結果を図II-2に示す。ケーブル・イン・コンジット型導体の場合コンジットを取り付けていないと素線がばらばらになってしまうので、コンジットへの入熱量評価を行う必要があったが、ホロー型の場合安定化銅及び素線は一体となっているので安定化銅+素線への入熱量をコンジット無しのサンプル(サンプルタイプは(b)とする)で直接評価した。

以上から入熱量の成分を計算した結果を図II-3に示す。

## 参考文献

- (1)辻博史ほか, Recent Progress in the Demo Poloidal Coil Program, IEEE Trans. Magn. MAG-25 No.2 pp.1484-1487 (1989)  
 (2)杉本誠ほか, Development of Hollow Cooling Monolithic Conductor for ITER TF Coil, Proceedings on MT-12, June 23-28 (1991)



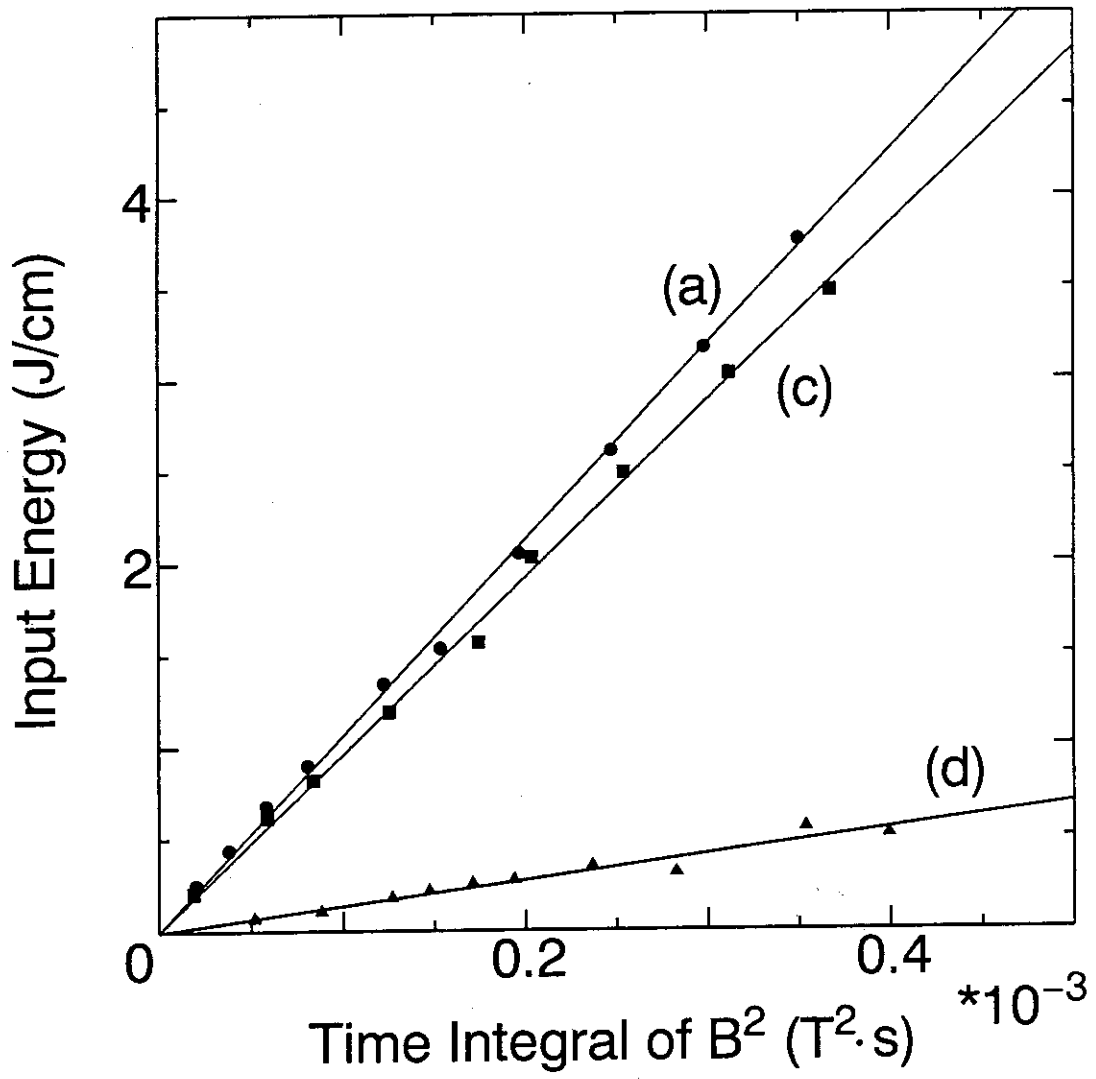
### Conductor

Superconductor	NbTi
Outside Dimension	35.3*29.7 mm
Strand Diameter	1.12 mm
Number of Strands	486
Strand Surface	Formvar
Material of Conduit	SUS304
Void Fraction	38 %

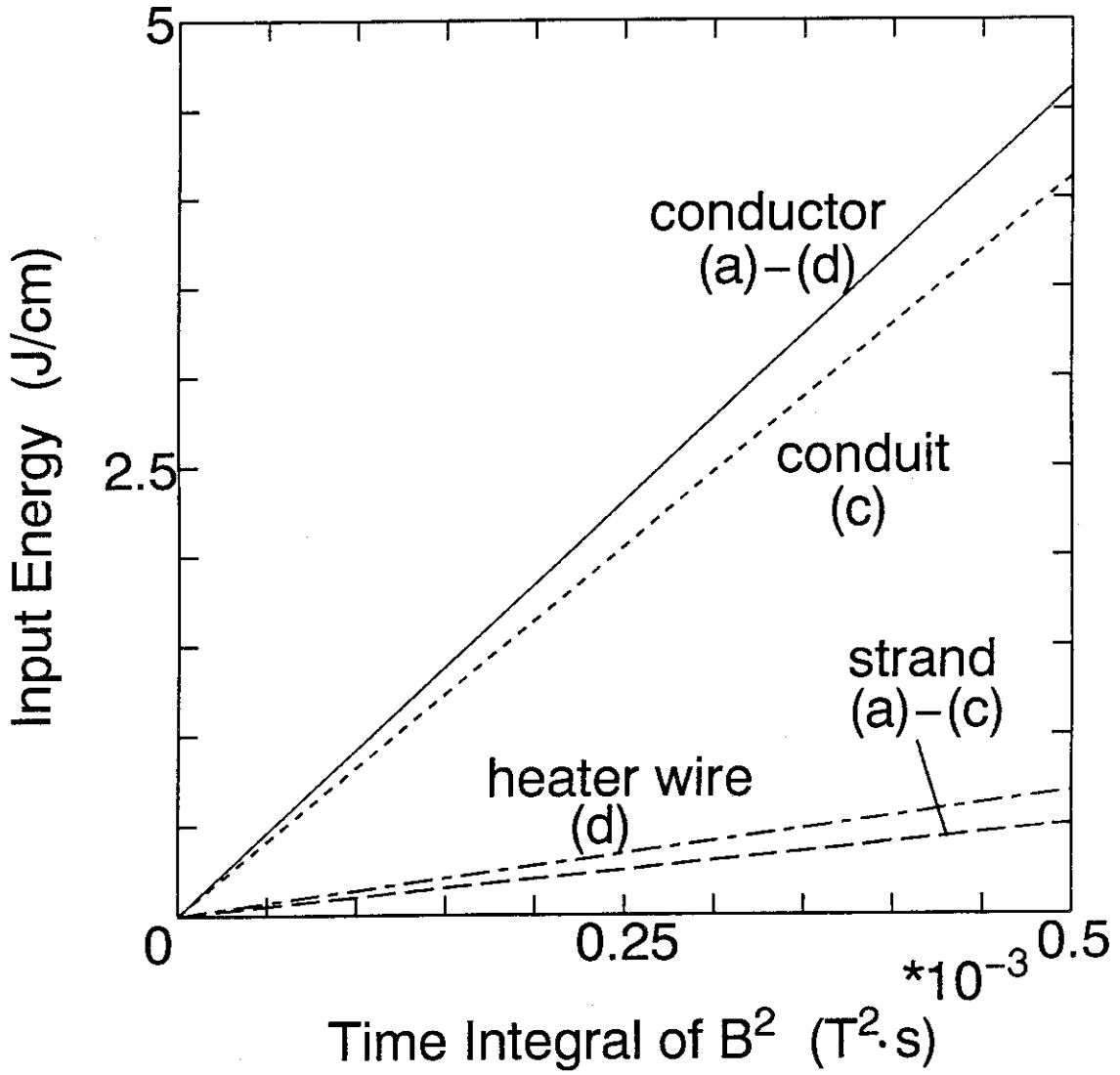
### Heater

Inside Dimension	40.3*34.7 mm
Thickness	1.0 mm
Length	93.0 mm
Number of Turns	87 (29-3parallel)

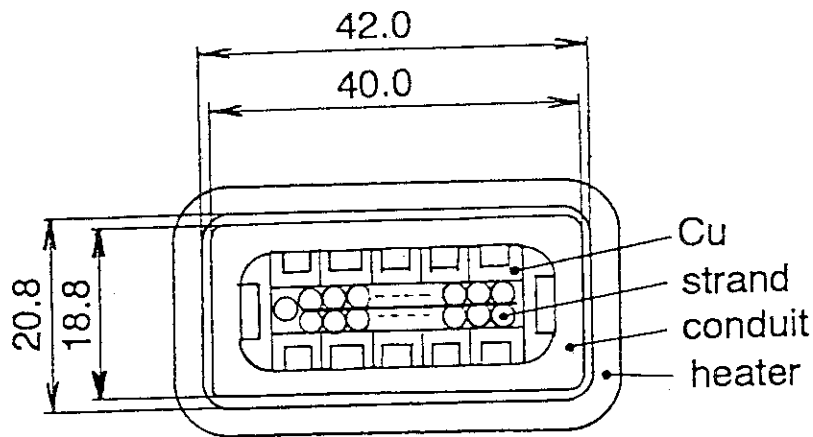
☒ I.1 Specifications of NbTi Cable-in-conduit Type Conductor and Inductive Heater



☒ I.2 NbTi Cable-in-conduit Type Conductor Inductive Heating Calibration



☒ I.3 NbTi Cable-in-conduit Type Conductor Components of Inductive Heating



### Conductor

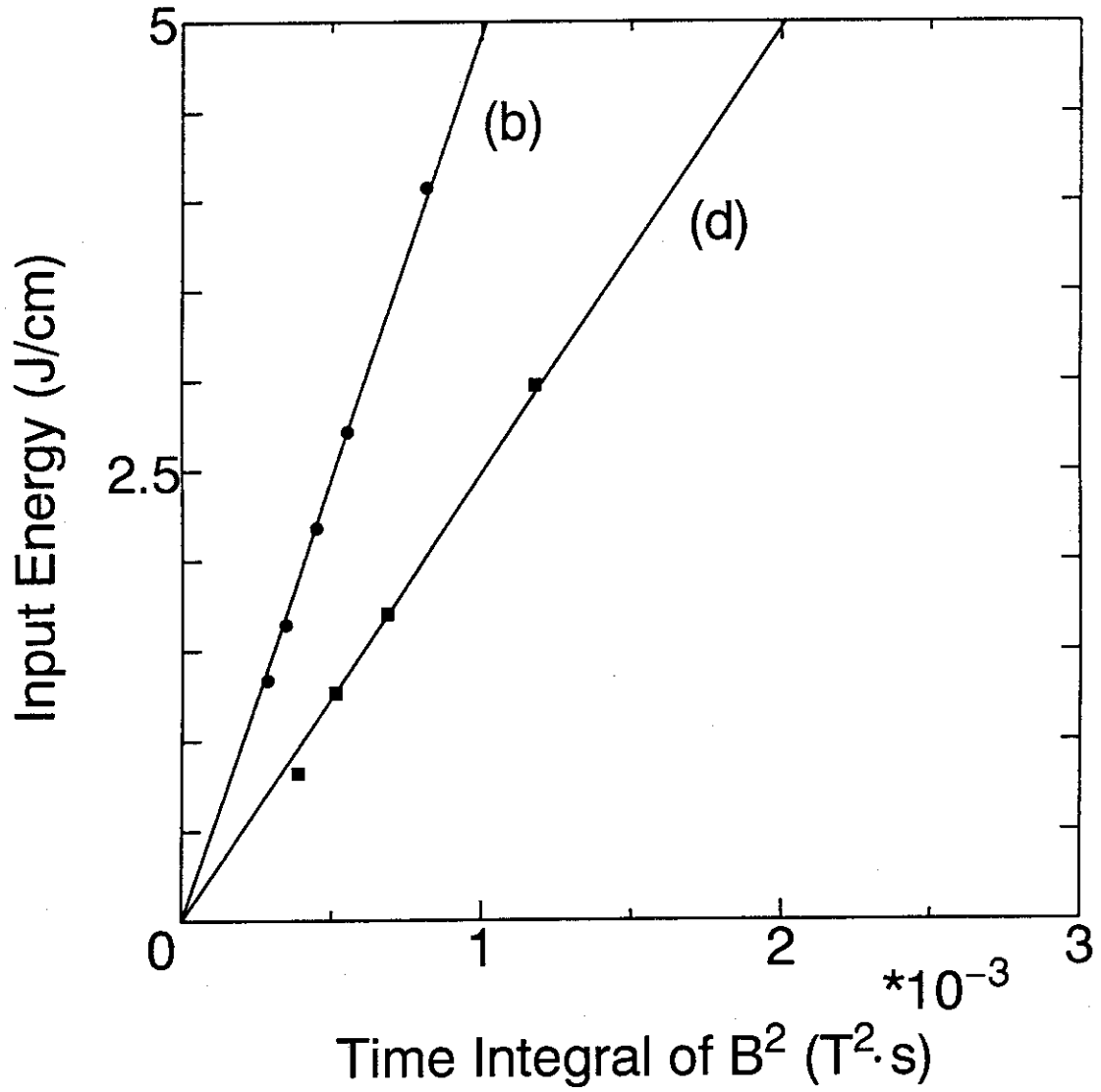
Superconductor	(NbTi) <sub>3</sub> Sn
Outside Dimension	40.0*18.8 mm
Strand Diameter	2.45 mm
Number of Strands	23
Strand	All Bronze
Material of Conduit	SUS304

### Heater

Inside Dimension	42.0*20.8 mm
Thickness	3.0 mm
Length	84.0 mm (42.0+30.0(gap)+42.0)
Number of Turns	234

☒ H.1 Specifications of (NbTi)<sub>3</sub>Sn Hollow Type Conductor and Inductive Heater





☒ II.2 (NbTi)<sub>3</sub>Sn Hollow Type Conductor Inductive Heating Calibration

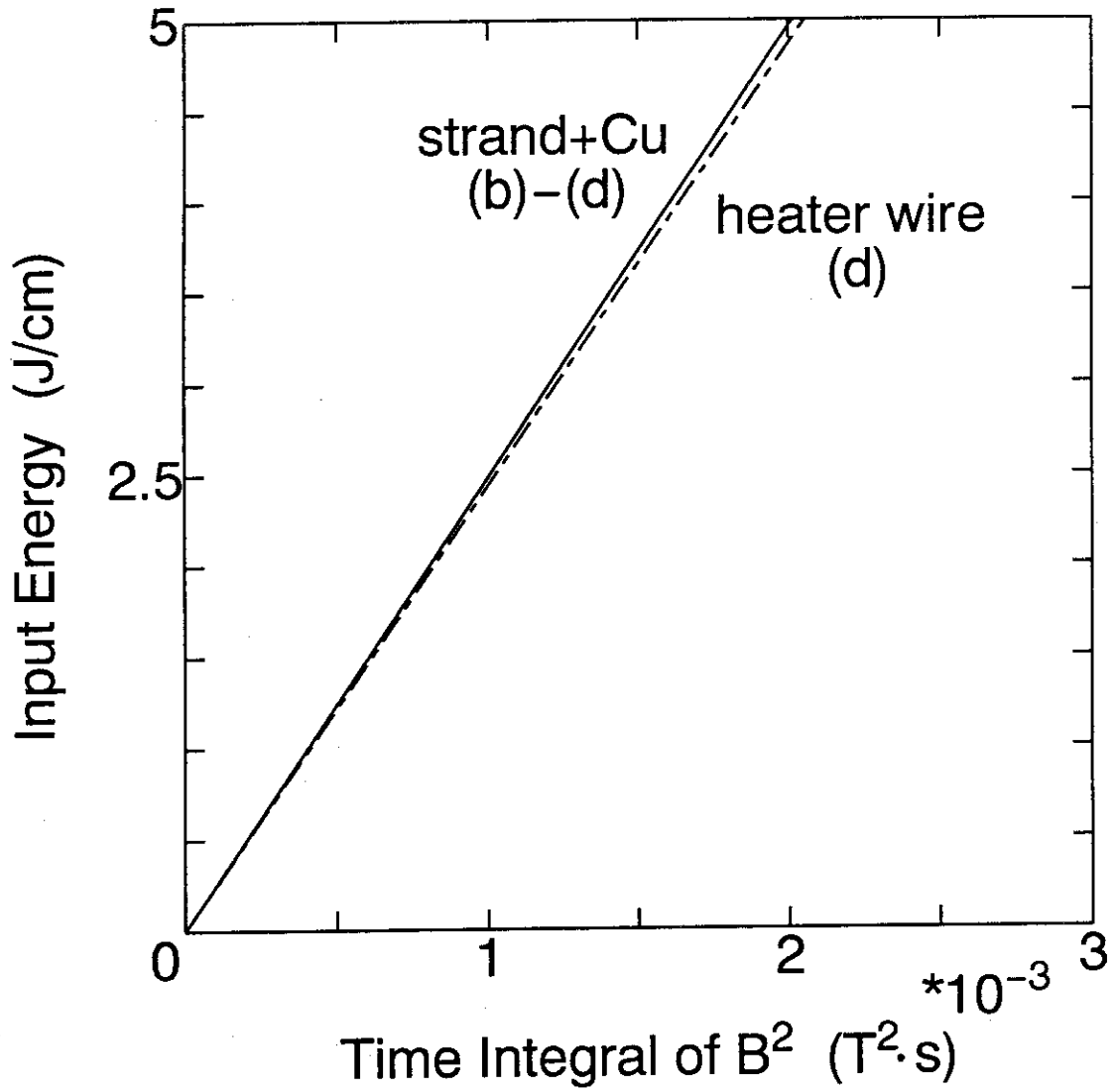


図 II.3 (NbTi)<sub>3</sub>Sn Hollow Type Conductor Components of Inductive Heating