

JAERI-M  
93-079

ITER用CSコイルのクエンチ解析

1993年3月

山本 恵一\*・吉田 清

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。

入手の間合わせは、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、お申しこみください。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）で複写による実費領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, Tokaimura, 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 ニッセイエプロ株式会社

ITER用CSコイルのクエンチ解析

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

山本 恵一\*・吉田 清

(1993年3月8日受理)

国際熱核融合実験炉 (ITER) で使用される中心ソレノイド (CS) コイルのような大型強制冷却型超電導コイルでは、コイル保護の観点からクエンチ時の冷媒であるヘリウムの圧力上昇や温度上昇を評価するクエンチ解析が重要となる。局所的なクエンチを取り扱うため、数値解析によりクエンチ解析を行った。

解析コードとしては、強制冷却型超電導コイルの安定性解析を目的に開発された“QSFC”を使用した。各種実験結果との比較によりクエンチ解析への適用の妥当性を検討し、“QSFC”によりクエンチ解析が可能である事を示した。EDA案のITER用CSコイルに対し解析を行った。局所的なクエンチにおける圧力上昇は、減衰時定数10秒の場合では全域クエンチでの圧力上昇に対し1/3程度の138 barであるが、減衰時定数20秒では200 bar以上になり、導体の大型化が必要である。

Quench Analysis for the ITER CS Coil

Keiichi YAMAMOTO\* and Kiyoshi YOSHIDA

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

(Received March 8, 1993)

The central solenoid (CS) coil for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is the large scale of the forced-flow superconducting coil. At a coil quench helium pressure rises up high value of several hundred bar. Therefore, the quench analysis is one of the important matters for the coil design.

The quench analysis was carried out by means of the stability analysis code "QSFC" developed by JAERI. One-dimensional fluid flow and energy transport equations are solved by means of the finite differential method in QSFC. Analyses for some experimental results are performed so that QSFC is able to be adopted to the quench analysis. The analysis results are in good agreement with the experiments.

In the ITER CS coil proposed in the engineering design activities (EDA) the pressure rises up 138 bar for the damping time of ten seconds. This value is one-third of the value evaluated by Miller's equation. However, the pressure rises up higher value for the damping time of 20 seconds. Therefore, the change of conductor design should be required.

Keywords: Superconducting, Magnets, Quench Analysis, Fusion,  
ITER, CS Coil

---

\* Visiting Researcher from Toshiba Corporation

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 解析方法 .....	2
2.1 流体基礎方程式 .....	2
2.2 熱伝達、温度及び発熱 .....	2
2.3 クエンチ解析 .....	3
3. 実験解析 .....	5
3.1 HELITEXの実験解析 .....	5
3.2 安藤氏の小型超電導導体の実験解析 .....	6
3.3 まとめ .....	7
4. ITER用CSコイルの圧力上昇 .....	20
4.1 ITER用CSコイル .....	20
4.2 解析モデル .....	20
4.3 解析結果 .....	20
5. 結 論 .....	29
謝 辞 .....	29
参考文献 .....	29

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Analysis Method .....	2
2.1 Fluid Fundamental Equations .....	2
2.2 Heat Transfer .....	2
2.3 Quench Analysis .....	3
3. Analysis for the Experiments .....	5
3.1 HELITEX Experiment .....	5
3.2 Ando's Experiment .....	6
3.3 Summary .....	7
4. Quench Analysis for the ITER CS Coil .....	20
4.1 ITER CS Coil .....	20
4.2 Analysis Model .....	20
4.3 Analysis Result .....	20
5. Conclusion .....	29
Acknowledgments .....	29
References .....	29

## 記 号 一 覧

$A_c$	: 安定化銅断面積	( $m^2$ )
$A_h$	: 冷媒 (ヘリウム) 断面積	( $m^2$ )
$A_w$	: 素線断面積	( $m^2$ )
$C_p$	: 冷媒 (ヘリウム) の定圧比熱	( $J / kg$ )
$C_w$	: 素線の比熱	( $J / kg$ )
$D_h$	: 水力直径	( $m$ )
$E_h$	: 流体の全エネルギー	( $J / kg$ )
$F$	: 流体の受ける摩擦力	( $Pa$ )
$f$	: 管摩擦係数	
$h$	: 素線表面から冷媒への熱伝達係数	( $W / m^2 / K$ )
$h_s$	: 定常熱伝達係数	( $W / m^2 / K$ )
$h_t$	: 過度熱伝達係数	( $W / m^2 / K$ )
$I_h$	: 冷媒 (ヘリウム) の内部エネルギー	( $J / kg$ )
$l_h$	: 冷却ペリメータ	( $m$ )
$P$	: 全圧力 ( $P = p + q$ )	( $Pa$ )
$p$	: 静圧力	( $Pa$ )
$Pr$	: プラントル数	
$Q$	: 熱流	( $W / m$ )
$Q_J$	: 常電導発熱	( $W / m$ )
$Q_h$	: 素線から冷媒への熱流	( $W / m$ )
$Re$	: レイノルズ数	
$r_c$	: 安定化銅の抵抗率	( $\Omega m$ )
$T_c$	: 臨界温度	( $K$ )
$T_{cs}$	: 分流開始温度	( $K$ )
$T_s$	: コンジットの温度	( $K$ )
$T_h$	: 冷媒 (ヘリウム) の温度	( $K$ )
$T_w$	: 素線の温度	( $K$ )
$u$	: 冷媒 (ヘリウム) の流速	( $m / s$ )
$\lambda_h$	: 冷媒 (ヘリウム) の熱伝導率	( $W / m^2 / K$ )
$\lambda_w$	: 素線の熱伝導率	( $W / m^2 / K$ )
$\rho_h$	: 冷媒 (ヘリウム) の密度	( $kg / m^3$ )
$\rho_w$	: 素線の密度	( $kg / m^3$ )

## 1. ま え が き

強制冷却型超電導コイルではクエンチが発生すると常電導部でのジュール発熱により、導体の温度が上昇するとともに、冷却流路内のヘリウムの圧力が上昇するが、国際熱核融合実験炉 (ITER) で使用される中心ソレノイド (CS) コイルのような大型の超電導コイルでは数百 bar にも達する。従ってコイル保護の観点から、クエンチ時の圧力上昇や温度上昇を把握する上でクエンチ解析は重要といえる。

圧力上昇の良く知られた評価方法としては J. Miller の式<sup>(1)</sup>があるが、全域クエンチを仮定しており、過大評価とならざるを得ない。圧力の上昇は瞬時に起きるわけではなく、温度上昇とともに時間的に成長する現象である。安藤、西氏等は全域クエンチでの圧力が最大となる時間を実験的にもとめ、圧力の時間変化を実験式<sup>(2)(3)</sup>として提案した。電流の減衰時定数をこの時間より短くできれば圧力上昇は J. Miller の式で求めた値より低くなる。しかし、コイルの大型化にともない通電電流値、インダクタンスとも大きくなり、耐電圧などの制約から減衰時定数も長くなる傾向にあり、安藤・西氏等の式の適用範囲外とならざるおえず、何らかの解析手段が必要となる。本報では ITER 用超電導コイルの開発を目的とした原型ボロイダルコイル (CS モデルコイル) の設計の一環として行った、クエンチ時の圧力上昇の検討と得られた結果について報告する。

実際にはクエンチは局所的に発生する。この効果を考慮するため、圧力上昇を数値解析により評価した。数値解析コードとしては強制冷却型超電導コイルの安定性解析を目的に開発された一次元流体解析コード "QSFC"<sup>(4)</sup>を使用した。クエンチ解析は、導体での発熱をもとにして、導体の温度、冷媒であるヘリウムの物性を解析する事になり、基本的には安定性解析と同じ手法が使える。しかし、安定性解析では扱う物理時間が 100 ms 程度と短いのに対し、クエンチ解析では数秒から 10 秒程度の現象を取り扱わなくてはならない。またクエンチの伝播等も取り扱う事になる。従って、すでに行われた実験との比較を行い、"QSFC" がクエンチ解析に適用できる事を確認したうえで、ITER 用 CS コイルの圧力上昇の評価を行った。

"QSFC" により常電導部の伝播等が取り扱え、コイルの局所的なクエンチによる圧力上昇は J. Miller の計算式で得られるものよりはるかに低くなる事が確認できた。低温でのヘリウムの物性は、圧力や温度に対し変化が激しく、多大な計算時間を必要とする。そのため、ここでは計算時間を短縮する事を主眼として計算のモデル化をはかったが、圧力伝搬という点に関しては現象をとらえきれなかった。



## 2. 解析方法

クエンチ解析に使用した"QSFC"は、強制冷却型超電導コイルの安定性解析を目的に開発された一次元流体解析コードである。"QSFC"による解析について以下に示す。

### 2. 1 流体基礎方程式

"QSFC"で使用されている基礎方程式を以下に示す。

[連続の式]

$$\frac{d}{dt}(\rho_h) + \frac{d}{dx}(\rho_h u) = 0 \quad (2.1)$$

[運動量保存則]

$$\frac{d}{dt}(\rho_h u) + \frac{d}{dx}(\rho_h u^2) = -\frac{d}{dx}(p) - F \quad (2.2)$$

[エネルギー保存則]

$$\frac{d}{dt}(\rho_h E_h) + \frac{d}{dx}(\rho_h E_h u) = -\frac{d}{dx}(P u) + \frac{Q}{A_h} \quad (2.3)$$

ここで、 $u$ は冷媒の流速、 $\rho_h$ は密度、 $E_h = I_h + u^2/2$ は流体の内部エネルギーと運動エネルギーの和である。式(2.1)(2.2)は粘性流体を表した一次元偏微分方程式である。式(2.2)はNavier-Stokesの式で、 $F$ は冷媒の受ける摩擦力で次式で与えられる。

$$F = 2 f \rho_h u^2 / D_h$$

ここで、 $f$ は管摩擦係数、 $D_h$ は水力直径である。

式(2.3)で流体の温度 $T$ は内部エネルギー $I_h$ から収束反復計算により求めることができる。圧力 $P$ は静圧 $p$ と動圧 $q$ の和からなる。 $Q$ は外部からの流体への入熱で、 $A_h$ は冷媒の断面積である。

### 2. 2 熱伝達、温度及び発熱

式(2.3)の外部からの熱流 $Q$ は次式で与えられる。

$$Q = Q_h + Q_s \quad (2.4)$$

ただし、 $Q_h$ は素線から冷媒への熱流、 $Q_s$ はコンジットから冷媒への熱流である。素線から冷媒への入熱 $Q_h$ は次式により定まる。

$$Q_h = h (T_w - T_h) l_w \quad (2.5)$$

ここで、 $h$ は熱伝達係数、 $T_w$ は素線の温度、 $T_h$ は冷媒の温度、 $l_w$ はペリメータである。熱伝達係数は、以下の式で与えられる過度熱伝達 $h_t$ と定常熱伝達 $h_s$ からなるが、いずれか大きい方を用いた。

$$h_t = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \lambda_h \rho_h C_p}{t} \right)^{-1/2} \quad (2.6)$$

$$h_s = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \lambda_h / D_h \quad (2.7)$$

ここで、 $\lambda_h$ は冷媒の熱伝導率、 $C_p$ は冷媒の定圧比熱、 $Re$ はレイノルズ数、 $Pr$ はプラントル数、 $D_h$ は水力直径である。

また、コンジットからの入熱 $Q_s$ は次式で与えられる。

$$Q_s = h (T_s - T_h) l_s \quad (2.8)$$

ここで、 $T_s$ はコンジットの温度である。素線の温度は導体長手方向の熱伝導を考慮するため以下の式で求める。

$$A_w \rho_w C_w \frac{dT_w}{dt} = A_w \frac{d}{dx} \left( \lambda_w \frac{dT_w}{dx} \right) + Q_j - Q_h + Q_{ex} \quad (2.9)$$

ここで、 $\rho_w$ は素線の比重、 $\lambda_w$ は素線の熱伝導率、 $T_w$ は素線の温度、 $C_w$ は素線の比熱である。 $Q_{ex}$ は外部からの入熱で、ジュール発熱 $Q_j$ は素線の温度 $T_w$ と分流開始温度 $T_{cs}$ 及び臨界温度 $T_c$ により以下の式で求める。

$$Q_j = 0 \quad (T_{cs} > T_w) \quad (2.10)$$

$$Q_j = A_c r_c j_c^2 \frac{T_w - T_{cs}}{T_c - T_{cs}} \quad (T_c > T_w > T_{cs}) \quad (2.11)$$

$$Q_j = A_c r_c j_c^2 \quad (T_w > T_c) \quad (2.12)$$

ここで、 $A_c$ は素線中の安定化銅の断面積、 $r_c$ は銅の比抵抗、 $j_c$ は銅に流れる電流密度である。

### 2.3 クエンチ解析

安定性解析では、外部からの入熱量をパラメータとして、どの程度の入熱までならば超

電導が回復するかの解析を行う。従って解析を必要とする時間は100ms程度である。これに対しクエンチ特性解析では、外部からの入熱でクエンチを引き起こし、冷媒であるヘリウムの温度や圧力、素線の温度変化及びクエンチの伝播を解析する。クエンチ時の電流の減衰時定数は数秒以上となる。従って数秒から10秒程度の時間にわたって解析を必要とする。計算時間として数十時間が予想されるため、本解析では特に計算時間の短縮に対し考慮をはかった。

使用する物性値のなかで、ヘリウムの物性は温度・圧力による変化が激しい。”QSF C”ではV.Arpa氏らのヘリウム・コード<sup>(6)</sup>を使用し、数値解析の高速化のために、プログラムの最適化をはかった。

### 3. 実験解析

QSF Cのクエンチ解析への検証を目的として、K f Kで行われたHELITEXの実験<sup>(6)</sup>及び、安藤・西氏等が行った強制冷却超電導導体のクエンチ伝播と圧力上昇に関する実験<sup>(2) (3)</sup>との比較を行った。HELITEXの実験は1 atm、4.17 KのHeを抵抗ヒータによりパルスの加熱しその時の各部の圧力変化を測定したもので、安藤・西氏等の実験は強制冷却型導体の全域及び一部をクエンチさせ、圧力の変化と伝播速度とを評価したものである。以下に得られた結果を示す。

#### 3.1 HELITEXの実験解析

##### (1) 実験の概要

HELITEXの実験はK f Kで解析コードの検証を目的に行われたもので、実験の概要をFig. 3.1に示す。内寸2×2 mm-長さ30 mの銅パイプに4.17 K-1 barのHeを入れておき、15 mの長さにあわせて取り付けられた抵抗ヒータとコンデンサー電源により、Fig. 3.2に示したパターンの入熱を与える。銅パイプ片端はバルブで閉じられており、加熱されたHeは圧力が上昇するとともに、解放端に向けて流れる。圧力は図中の3点で測定された。

##### (2) 解析モデル

計算モデルは端部の2 mを考慮し、32 mの長さとした。また、入熱量は $x = 17 \sim 32$  mでは一定とし、数値解析上の不安定をさけるため、 $x = 13 \sim 17$  mの間で直線的に減衰させた。ただし、総入熱量は実験と一致するようにした。銅パイプの片端はバルブで閉じられており、この点では流量は常に0である。従ってこの点に対し対称になっている全長64 mのモデルと等価といえるため、QSF Cの対称境界条件を使用し、クエンチ解析で計算時間短縮に必要となる対称境界条件の効果の確認も行った。計算上では $x = 0$  mが解放端に対応する。計算条件をTable 3.1に示す。入熱は実験に合わせてHeに対し直接与え、管摩擦係数はレイノルズ数 $Re$ に対し次式で与えられるものとした。

$$f = 0.3164 \times Re^{-0.25}$$

##### (3) 解析結果

計算点の間隔を0.5 m、時間増分を100  $\mu$ sとした時のHe温度と圧力の分布及び時間変化をFig. 3.3に示す。圧力が測定された $x = 32$  m及び17 mでの圧力変化の計算結果と実測値の比較をFig. 3.4に、代表的な時間での速度分布をFig. 3.5に示す。Fig. 3.

5で実線が計算値、白丸が実測値で、圧力変化の計算値は実測値と良く一致する。速度分布もK f Kで開発されたコードでの結果と良く一致した。従ってHeへの入熱量が把握されていればQ S F Cにより、ヘリウムの状態変化をシミュレーションできる事が確認された。また入熱の変化がゆるやかな場合には、時間増分は100  $\mu$ sとかなり大きくとることができた。

### 3. 2 安藤氏の小型超電導導体の実験解析

#### (1) 実験の概要

実験は超電導材NbTiを用いたCable-in-conduit型の超電導導体を用いて行われた。導体諸元をTable 3.2に示す。導体の全長は26 mで、クエンチは中央部に取り付けられた誘導ヒータで発生させ、クエンチ5 s後に2 sの時定数で電流を減衰させた。ヘリウムの初期流量は0で、圧力は10 barである。実験で得られた圧力の時間変化及び、伝播速度をFig. 3.6に示す。

#### (2) 解析モデル及び条件

計算は物理時間で10 s程度行う必要があり、計算時間が数十時間となる事が予想される。そのため、対称境界条件を用いることで節点数を半減させ、計算時間の短縮をはかった。またクエンチの伝播長は実験的に時間の1.6乗に依存するため、計算点間隔は端部にゆくにつれ大きくする事で、計算点数を減らし、計算時間をさらに短縮させた。最小計算点間隔は0.25 mである。計算モデルをFig. 3.7に示す。Fig. 3.7において4 mおよび8 m  $\times$  2カ所の計算点は境界の影響をのぞくために用意した。初期加熱は中央部の2点に対して与えた。また、時間増分を1  $\mu$ s以上にすると計算結果が発散するため、時間増分は1  $\mu$ sとした。

使用した計算条件をTable 3.3に示す。実際のペリメータは0.04 m程度であるが、計算上は0.5 mとした。Q S F Cではインデューストフローのような断面内の効果は無視しているため、ペリメータの少ない縮小導体レベルの計算を行う場合はペリメータを実際より大きくする必要がある。ここでは約10倍とした。なお解析ではステンレス製コンジットの効果は無視した。

#### (3) 解析結果

外部の磁場は実験に合わせ全域7 Tとし、電流値を変数として解析を行った。電流値が1.9 kAの時のヘリウムの温度及び圧力の分布と時間変化をFig. 3.8に示す。Fig. 3.9

は中央部および中央部から1 m離れた位置での圧力の時間変化を、電流値を変数として示したものである。中央部では誘導ヒータによる初期加熱で圧力は瞬時に上昇するが、その後数秒間は圧力は一定となった後に上昇を開始する。Fig. 3.10に常電導部の増加の時間依存性を示す。電流値の増加に伴い、常電導の伝播速度は速まり、時間に対しほぼ1.6乗で増加するなど定性的には実験と一致するが、常電導の伝播速度は実験値よりかなり遅い。また、計算結果では1 m離れた位置での圧力が上昇を開始するまでに1~3 s程度遅れている。Fig. 3.8とFig. 3.3の圧力分布を比較すると、Fig. 3.8では常電導部と超電導部との境界で圧力が急激に下がっている。計算時間の短縮をはかるため計算点間隔を端部にゆくにつれ大きくしたことが、圧力の伝搬を抑える結果となったものと考えられる。

Fig. 3.11に中央部0.5 mでのノーマル電圧の計算値と、実験で得られた0.56 mの長さの部分に対する電圧を示す。実験結果は電流値1.9 kAに対するもので、計算値は実験値より低めとなっている。これはQSF C内では銅の残留抵抗比(RRR)として100を仮定しているが、実験で使用した超電導線はNbTiであり、加工硬化などでRRRが低下したためと考えられる。従って計算上の発熱は実験でのものより低くなっているものと考えられる。

実験で得られた圧力と計算値とを比較すると、計算上の発熱が少ないにもかかわらず、計算値が高めとなっている。これも圧力の伝搬を抑えられたためと考えられる。従って、提案した計算モデルではクエンチ時の圧力は、実際の圧力より高めに評価されるといえ、圧力の伝搬という点では問題があるが、安全率を考慮する設計という観点からは安全側の評価が行える。

### 3.3 まとめ

HELITEXの実験及び安藤氏の小型超電導々体の実験に対し実験解析を行い、解析結果はHELITEXの実験結果と良く一致し、安藤氏の小型超電導々体の実験結果と定性的に一致した。また常電導の伝播を解析できる事を実証した。

本研究では計算時間の短縮に主眼をおいた計算のモデル化をはかったが、圧力の伝搬に関してはとらえきれなかった。HELITEXの実験に対する解析では圧力伝搬をとらえていることから、計算時間の増加を無視すれば、計算点間隔を細かく、等間隔とする事で改善されるものと考えられる。計算モデルの最適化が今後の課題である。

Table 3.1 Calculate condition for HELITEX experiment.

Helium cross section	4.0	mm <sup>2</sup>
Hydraulic diameter	2.0	mm
Initial temperature	4.14	K
Initial pressure	1.0	bar

Table 3.2 Parameters of the conductor for Ando's experiment.

Cable configuration	3 x 6 x 0.98 mm NbTi/Cu strand + 1 mm Steel wire	
Conduit inner dia.	5.74	mm
Conductor length	26	m
Void fraction	48.1	%
Hydraulic dia.	0.694	mm
Ratio of Cu/NbTi	3	

Table 3.3 Calculate condition for Ando's experiment.

Cu cross section	10.0	mm <sup>2</sup>
He cross section	13.4	mm <sup>2</sup>
Hydraulic diameter	0.694	mm
Perimeter	0.5	m
Magnetic Field	7.0	T
Cooling channel length	40.25	m
Initial pressure	10.0	bar
Initial temperature	4.2	K
Critical temperature	4.95	K
Current sharing temperature	4.95	K

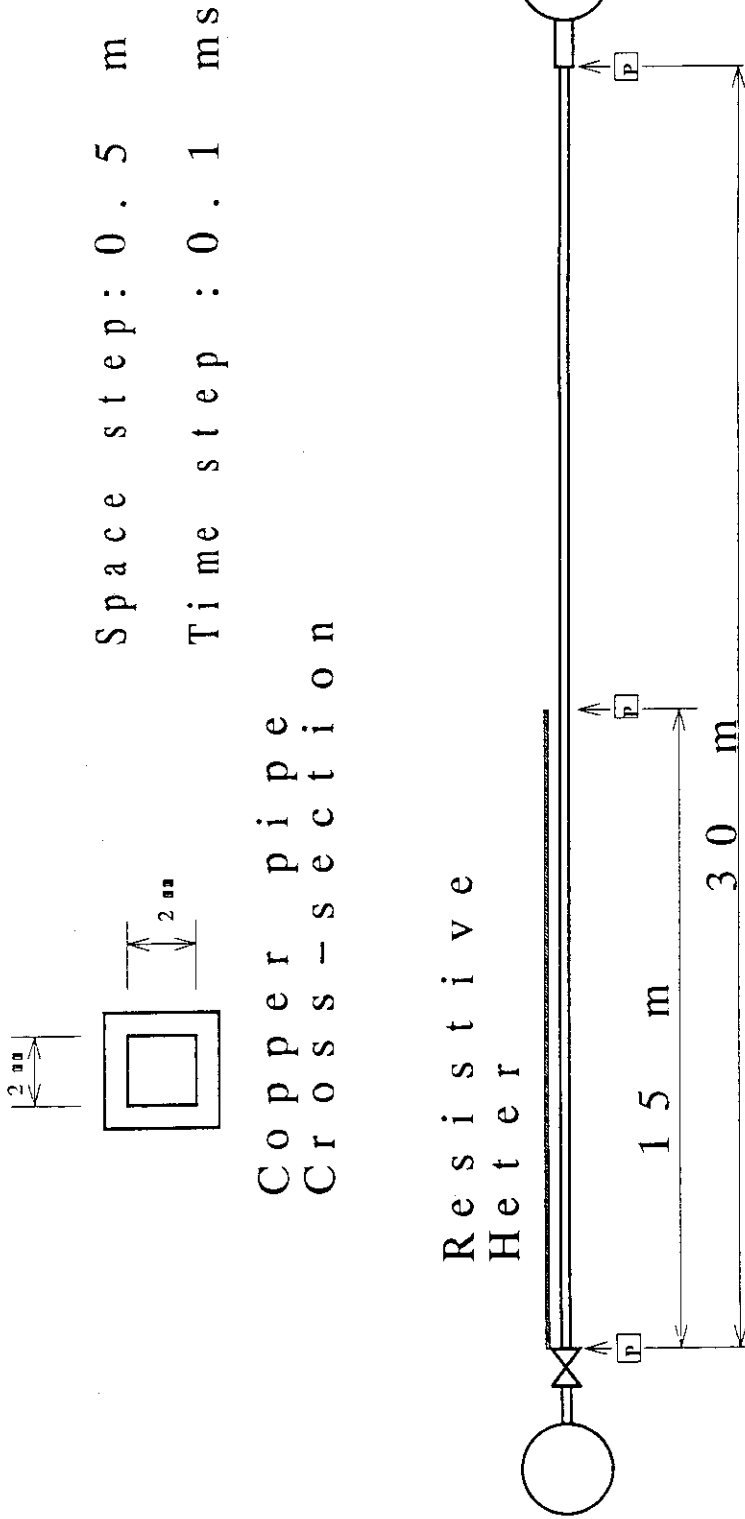


Fig. 3.1 Schematic view of the apparatus of the HELITEX experiment.



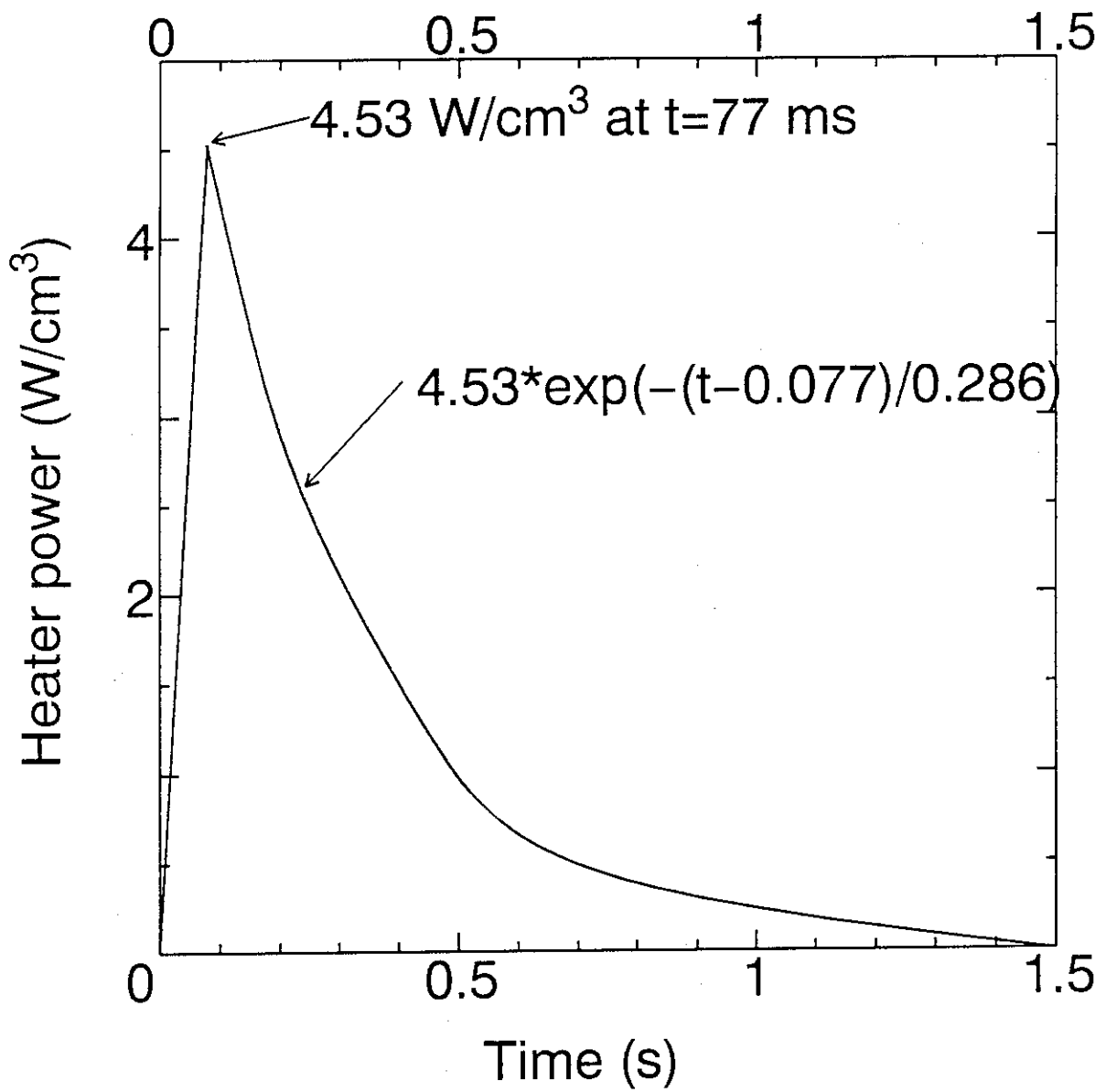
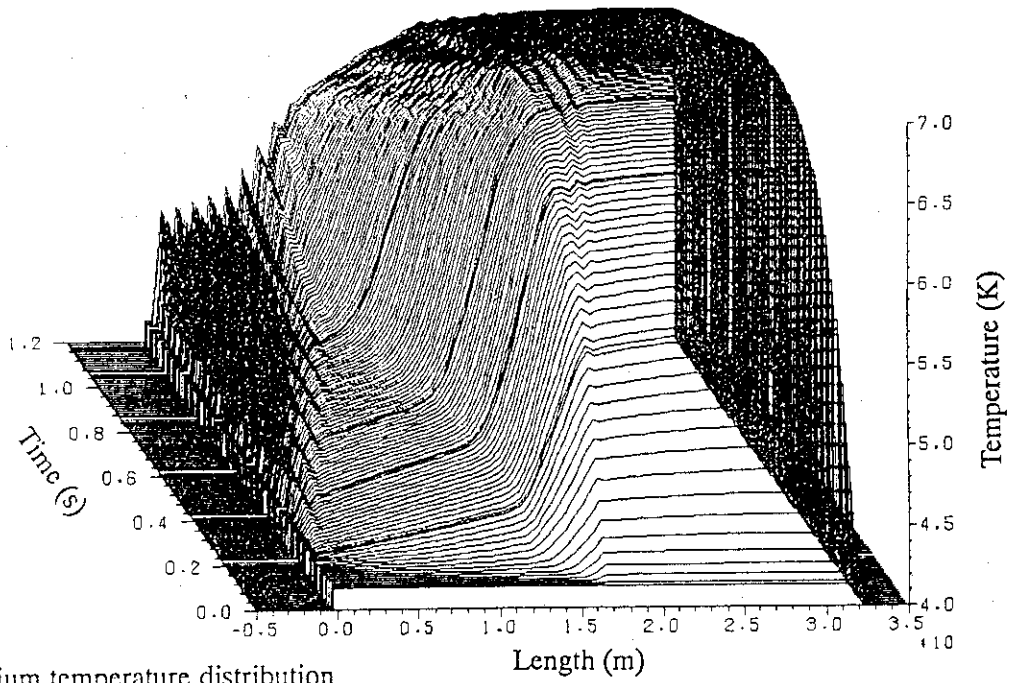
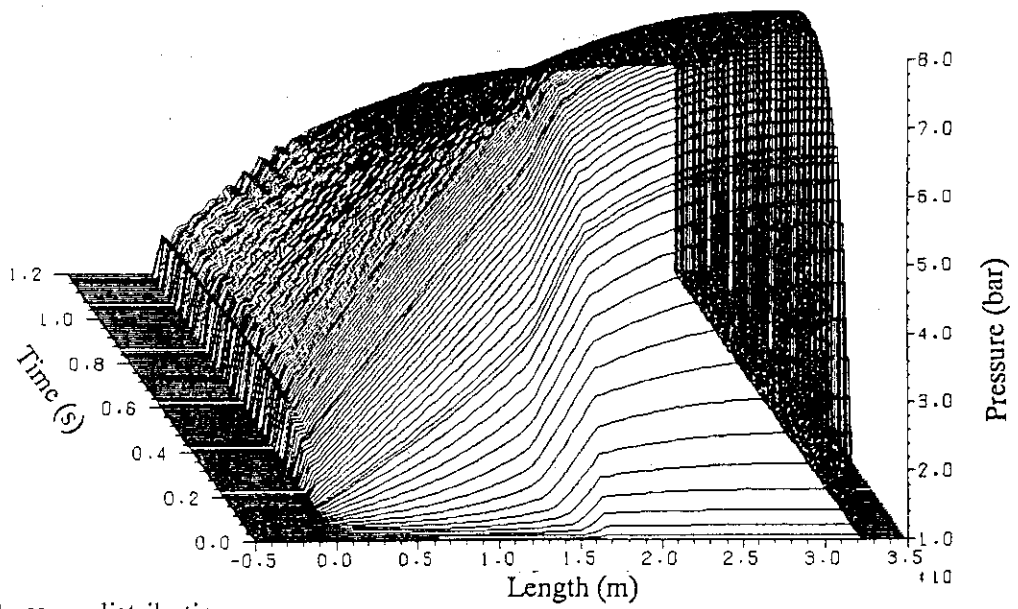


Fig. 3.2 Time variation of the heating power.

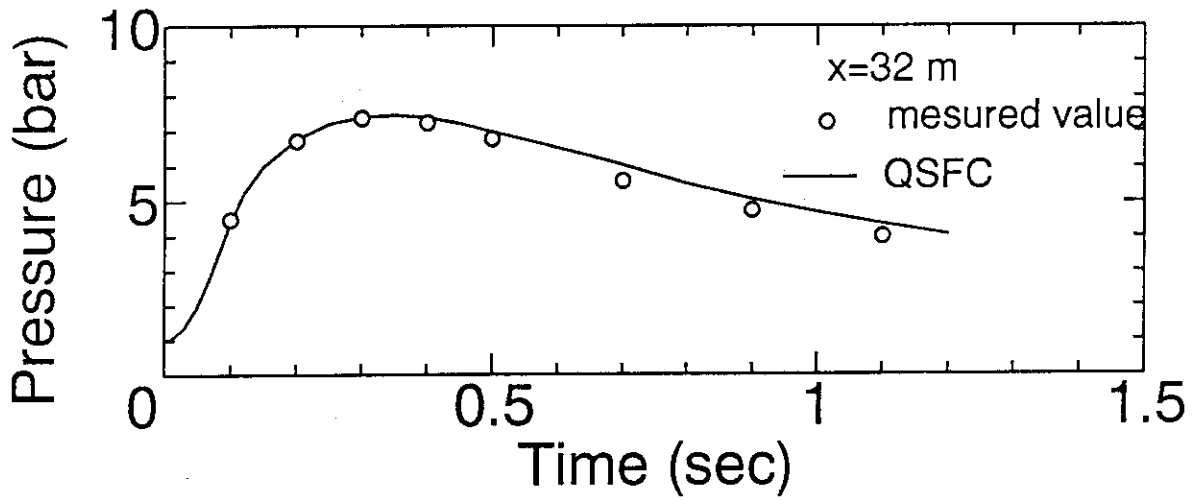


(a) Helium temperature distribution

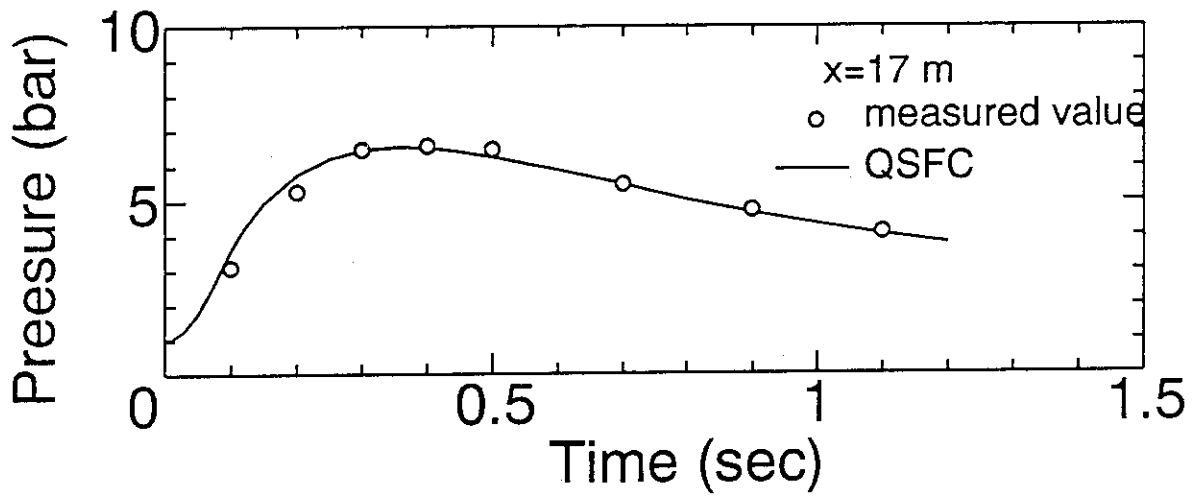


(b) Pressure distribution

Fig. 3.3 Helium temperature and pressure distribution as a function of space and time.



(a) Pressure at x=32 m



(b) Pressure at x=17 m

Fig. 3.4 Comparison of analyzed (solid line) and measured (circles) pressure.

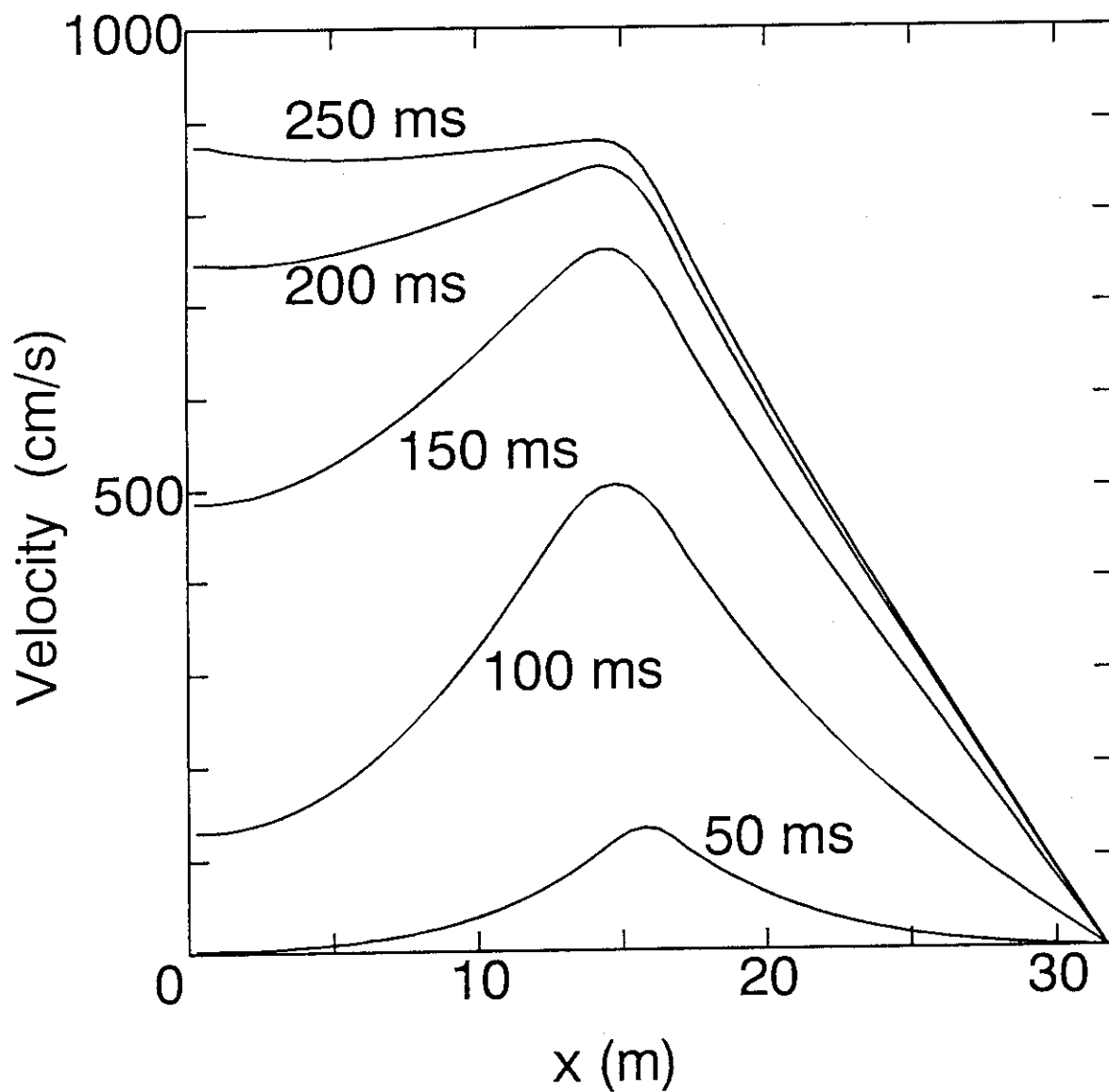
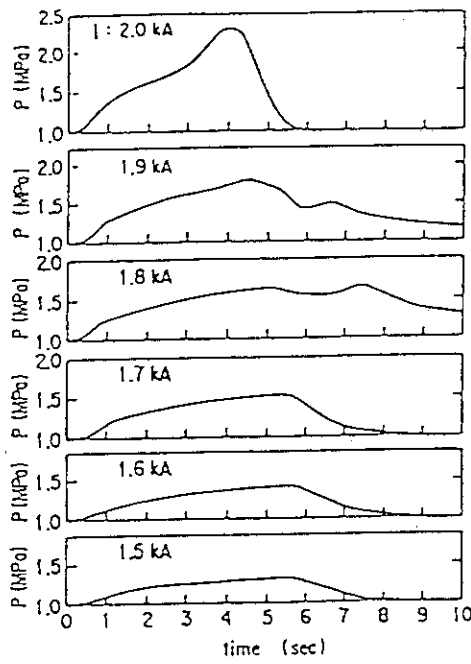
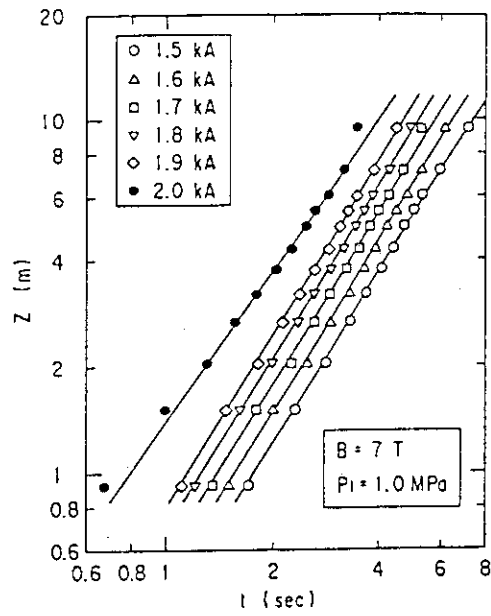


Fig. 3.5 Calculated velocity profiles at different times.



(a) Pressure rise traces for various transport currents at 7 T.



(b) Normal zone length vs. time at 7 T

Fig. 3.6 Ando's experimental results. (reference 2 and 3)

Cu cross section	10.0	mm <sup>2</sup>
He cross section	13.4	mm <sup>2</sup>
Hydraulic diameter	0.694	mm
Perimeter	0.5	m
Initial pressure	10.0	bar
Initial temperature	4.2	K

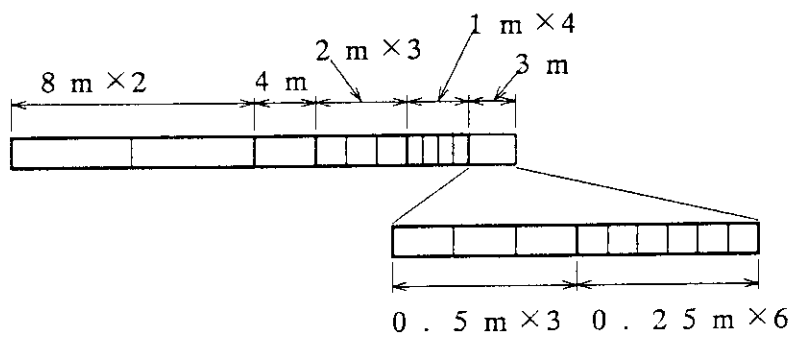
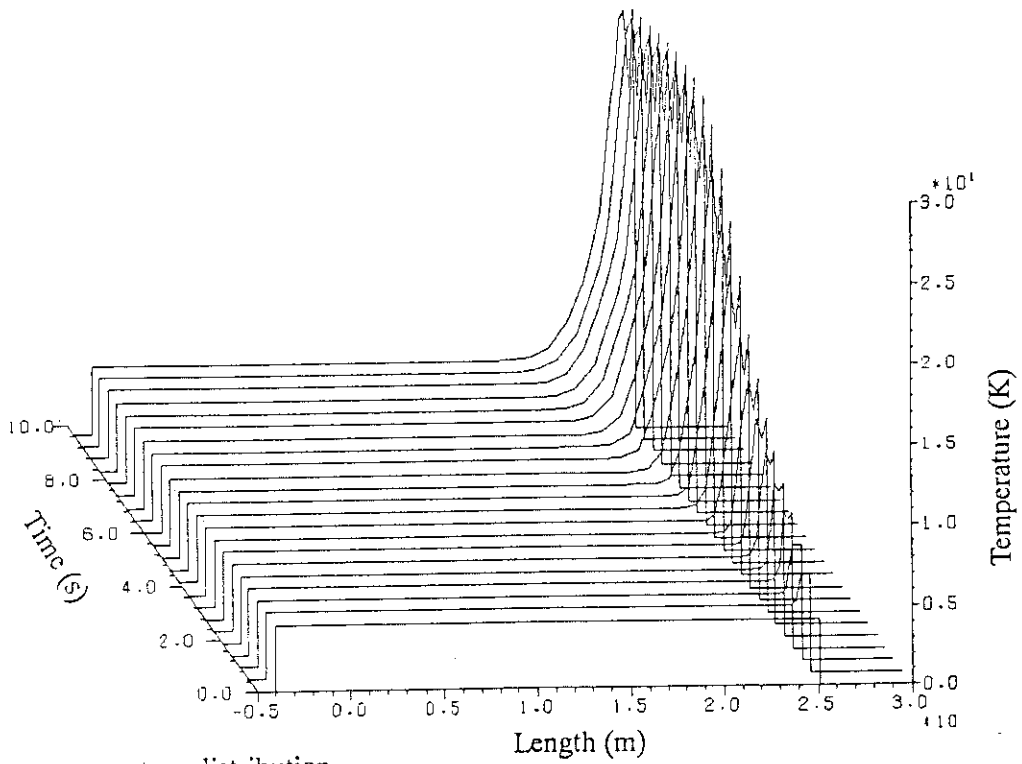
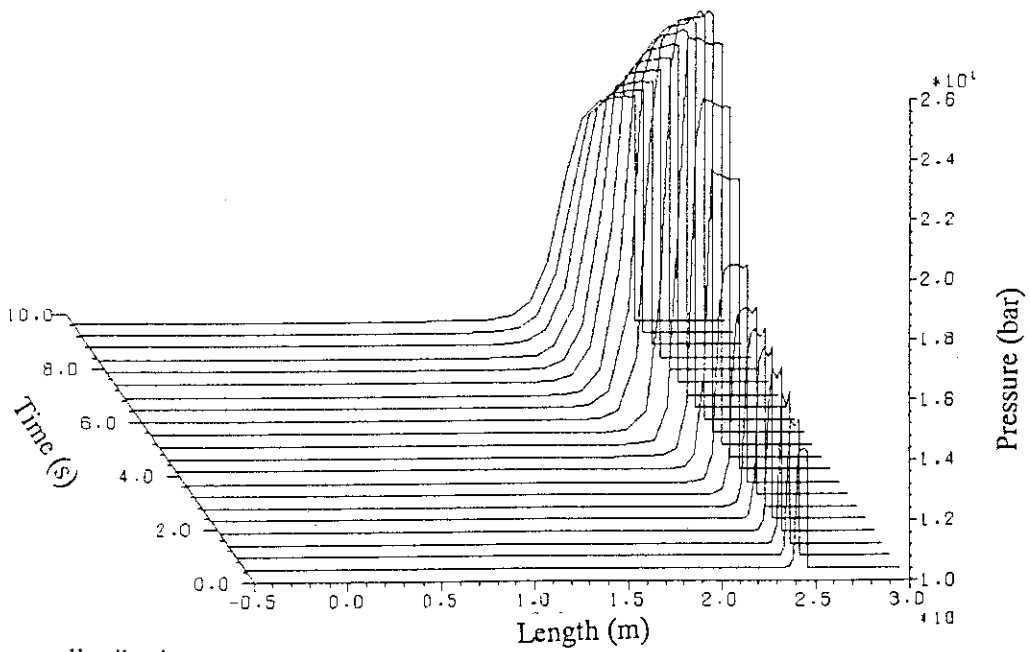


Fig. 3.7 Analysis model for Ando's experiment.



(a) Helium temperature distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 3.8 Helium temperature and pressure distribution as a function of space and time.

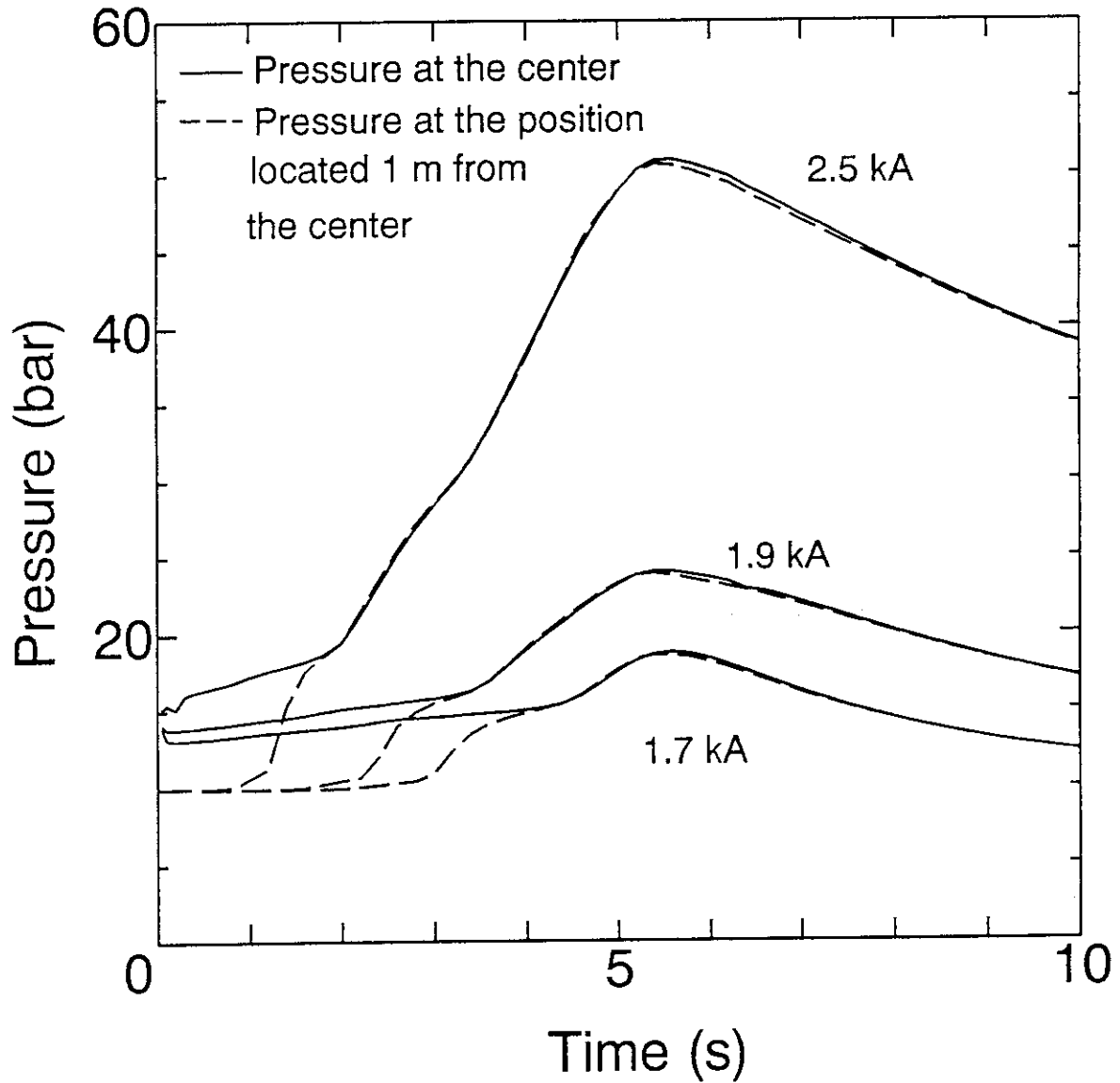


Fig. 3.9 Pressure pattern at the center and the position located 1 m from the center.



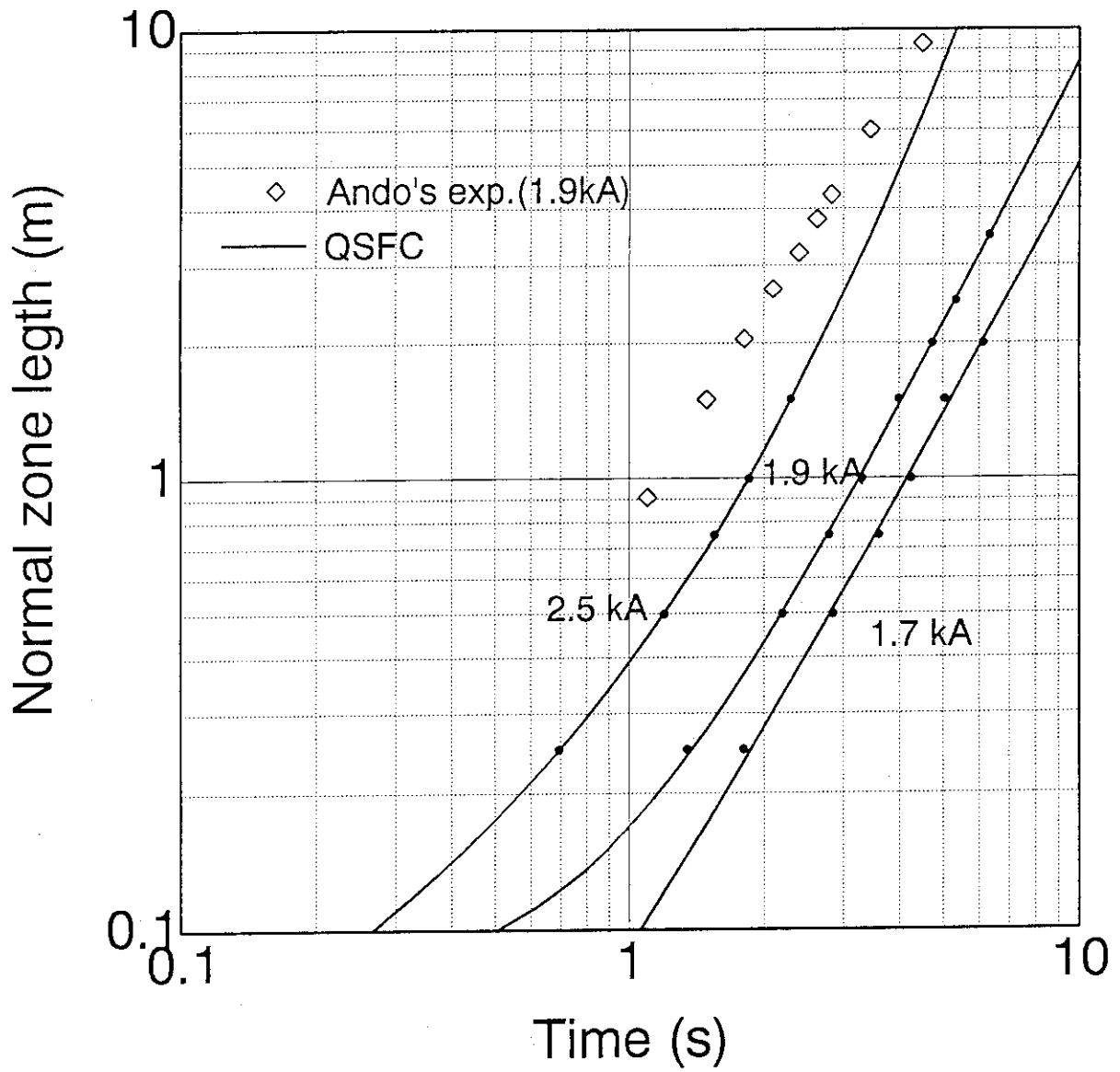
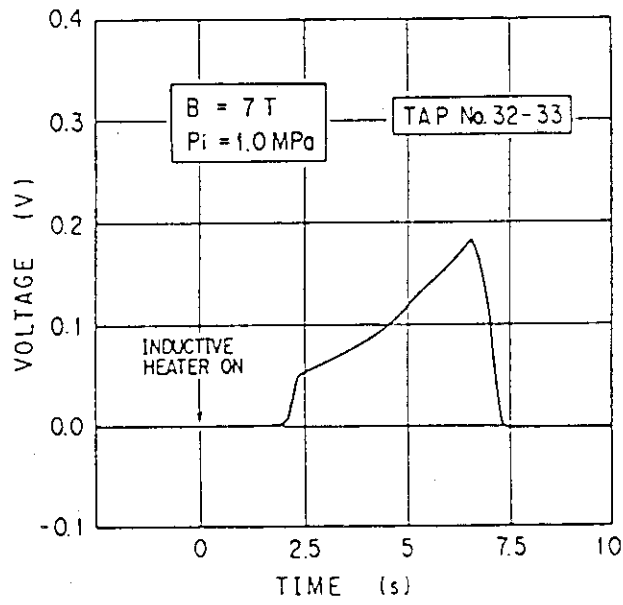
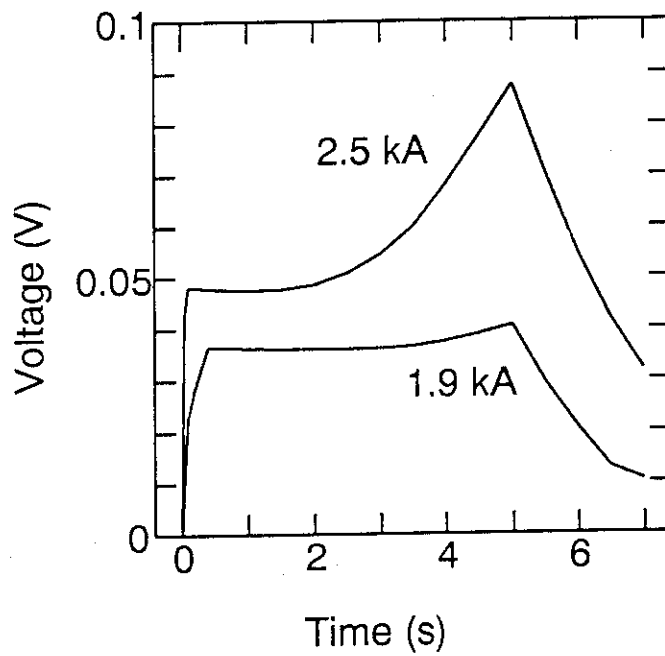


Fig. 3.10 Normal zone length vs. time for several transport currents.



(a) Measured voltage (1.9 kA)



(b) Calculated voltage

Fig. 3.11 Comparison of the resistive voltage. Measured voltage is on tap No. 32-33, of which length is 0.56 m. Calculated one is the voltage for the length of 0.5 m.

## 4. ITER用CSコイルの圧力上昇

現在ITER-EDAで検討されているCSコイルに対し、クエンチ時における圧力上昇の検討を行った。レアー巻きでは流路に沿った磁場はほぼ一定であり、また流路長も数百mと長いため、クエンチ時の圧力上昇は深刻な問題となる。さらにEDAにおける提案では、電流の減衰時定数が20sと長く、圧力上昇・温度上昇いずれにおいても好ましくない条件となっている。以下では減衰時定数10s及び20sに対し検討・比較を行った。

### 4.1 ITER用CSコイル

想定したITER用CSコイルは4段階にグレーディングされており、各グレードに対してのコイルサイズをTable 4.1に示す。各層は6流路で構成され、最内層での流路長は429mである。最内層での導体諸元をTable 4.2に示す。J. Millerの式によるクエンチ時の圧力上昇はH-ゲルトで486barである。

### 4.2 解析モデル

検討は磁場が最大となり、条件的に最も厳しいと考えられる最内層に対し行った。計算モデルは圧力の伝搬という点では問題があるが、計算時間を短縮するために、3.2節と同様のものとした。即ち、クエンチは流路中央で発生するものとする事で対称条件を使用し、計算点間隔を中央部は細かくし、端部に近づくにつれ粗くした。磁場は全域13Tとした。計算条件をTable 4.3に示す。レアー巻きCSコイル導体の中心にはHe流路が設けられているため、水力直径はこの流路の直径に合わせた。初期加熱は $150\text{ W/cm}^3 \times 10\text{ ms}$ とし、加熱長は1mとした。計算上ではステンレス製コンジットの効果は無視した。また、クエンチの検出遅れ時間を考慮し、クエンチ後1s間は電流値は一定で、その後遮断されるものとした。

### 4.3 解析結果

減衰時定数が10sの時のヘリウムの圧力と温度の分布とその時間変化をFig. 4.1に示す。Fig. 4.2は減衰時定数が20sの時のヘリウムの圧力・温度の分布と時間変化である。流路中央での銅及びヘリウムの温度の時間変化をFig. 4.3に、圧力の変化をFig. 4.4に示す。図中で実線が減衰時定数10sに対応し、破線が20sに対応する。

減衰時定数が10sの場合には、圧力は10s後に138barで最大となる。温度も10s後に75Kとなり、Fig. 4.3より最終温度は100K程度と推定できる。減衰時定数が20sの場合には圧力は10s後に196barまで上昇し、さらに上昇し続ける。温度上昇も10s時点で100Kをこえ、上昇率は8sあたりからさらに増加する傾向に

ある。

減衰時定数を10 sとした時の圧力上昇は、J. Millerの式による値の1/3程度であるが、減衰時定数が20 sの場合には10 s後で1/2であり、さらに上昇する傾向にある。従って減衰時定数20 sを採用するには、銅の量を増やす事で発熱を減らし、温度上昇・圧力上昇を低く抑える必要がある。

常電導部の増加の様子をFig. 4.5に示す。クエンチ直後の伝搬速度は減衰時定数による差が見られないが、5 sあたりから電流の減衰が少ない減衰時定数20 sでの伝搬速度が速くなる。クエンチ1 s後には常電導部は5 m程度まで広がり、4 s後には30 mに達しており、クエンチの伝播は非常に速い。採用した計算モデルでは圧力の伝搬が実際より遅くなる傾向にあるため、実際のクエンチ伝播はさらに速くなる可能性がある。クエンチの伝播を考慮すると、時定数が長くなるとノーマル部の成長範囲も長くなるため、クエンチ保護の観点からは好ましくない。

検討では銅の残留抵抗比(RRR)100を仮定した。RRRの低下は発熱の増加を引き起こし、圧力・温度ともさらに上昇する原因となり、RRRの向上は圧力・温度に対する設計上の裕度となる。従って、線材開発においてRRRおよび13 Tでの銅の比抵抗に対し留意する必要がある。

Table 4.1 Parameters of the ITER CS coil used for the calculation.

		H-grade	M1-grade	M2-grade	L-grade
Mean radius	m	2.1199	2.2996	2.4728	2.65665
Radial thickness	m	0.15975	0.14985	0.1866	0.1778
Height	m	12.0998	12.1008	12.1008	10.4994
Turn		594	648	960	912
Cooling channel length	m	429-452	505-529	600-637	616-649

Table 4.2 Parameters of the H-grade conductor used for the calculation.

Rated current	kA	41.9
Critical current	kA	83.8 (at 14.0 T)
Superconductor		(NbTi) <sub>3</sub> Sn
Conduit		
material(first conduit)		Ti
material(second conduit)		SS
outer dimension	mm	51.25 x 59.11
Cable space		
Outer diameter	mm	34.8
Inner diameter	mm	17.0
Center channel		
Outer diameter	mm	15.0
Non-Cu cross section	mm <sup>2</sup>	199.8
Cu cross section	mm <sup>2</sup>	259.8
Void fraction	%	35.9
Perimeter	m	2.245

Table 4.3 Calculate condition for the ITER CS coil .

---

Rated current	41.9	kA
Cu cross section	259.8	mm <sup>2</sup>
He cross section	436.8	mm <sup>2</sup>
Hydraulic diameter	15.0	mm
Perimeter	2.245	m
Half cooling channel length	240.0	m
Magnetic field	13.0	T
Initial pressure	6.0	bar
Initial temperature	4.5	K
Critical temperature	10.5	K
Current sharing temperature	6.89	K

---

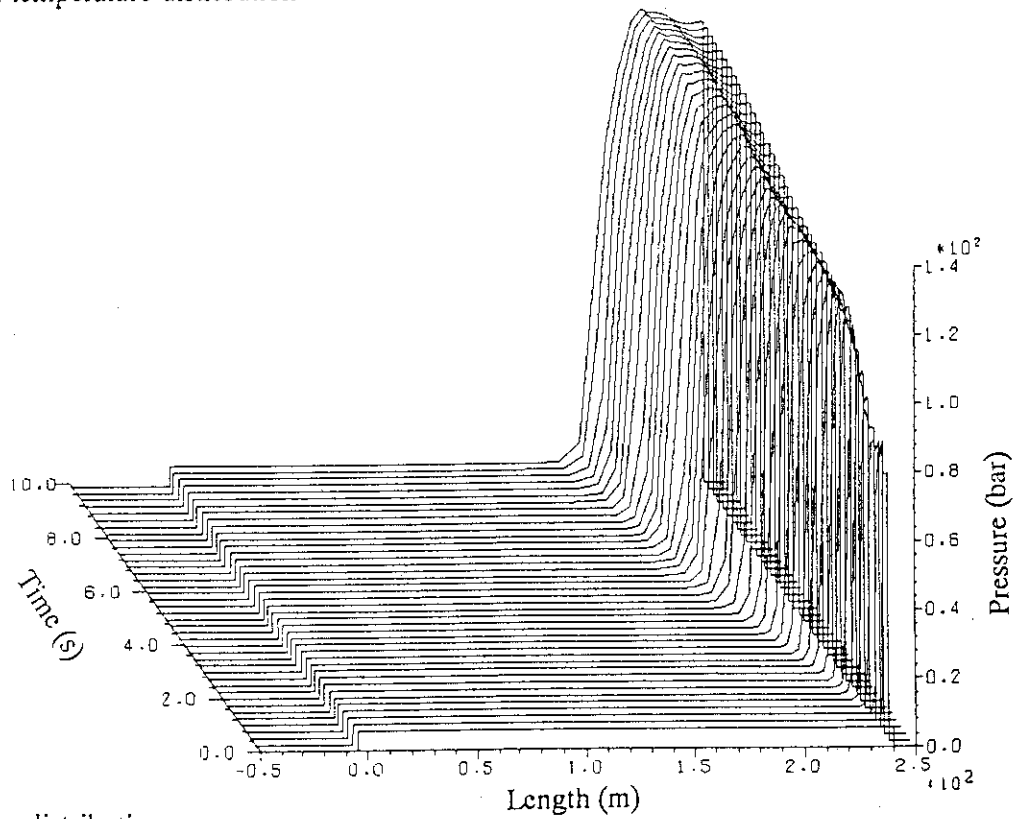
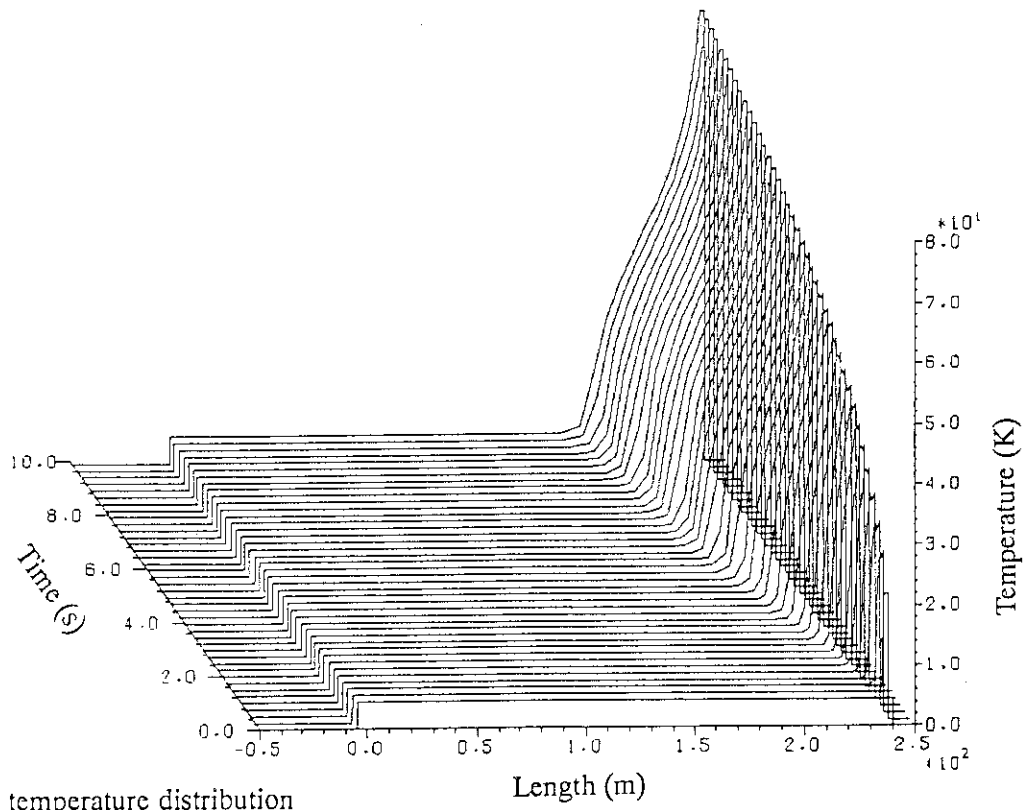
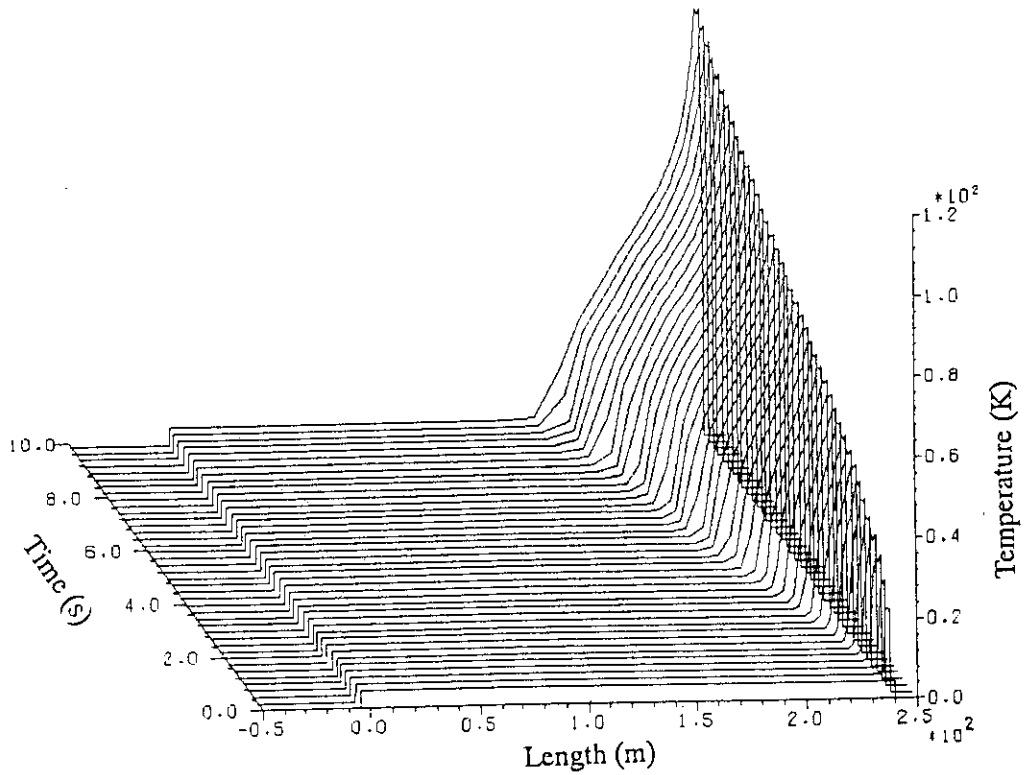
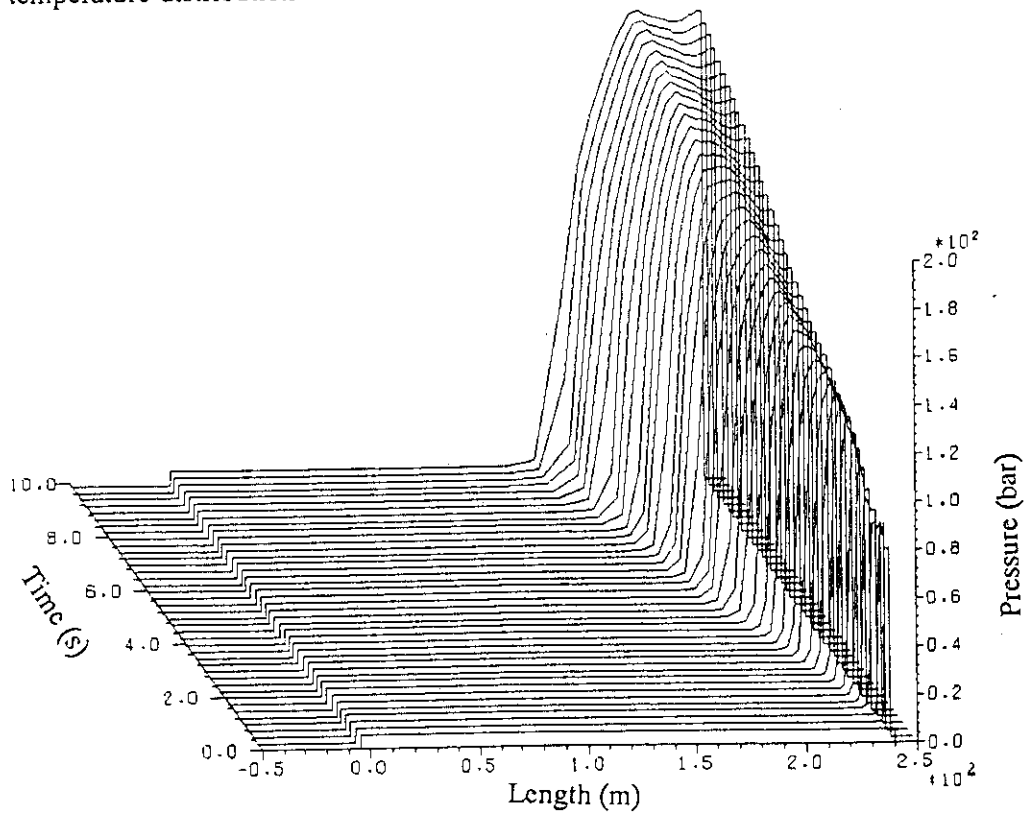


Fig. 4.1 Helium temperature and pressure distribution as a function of space and time for the damping time constant of ten seconds.



(a) Helium temperature distribution



(b) Pressure distribution

Fig. 4.2 Helium temperature and pressure distribution as a function of space and time for the damping time constant of 20 seconds.



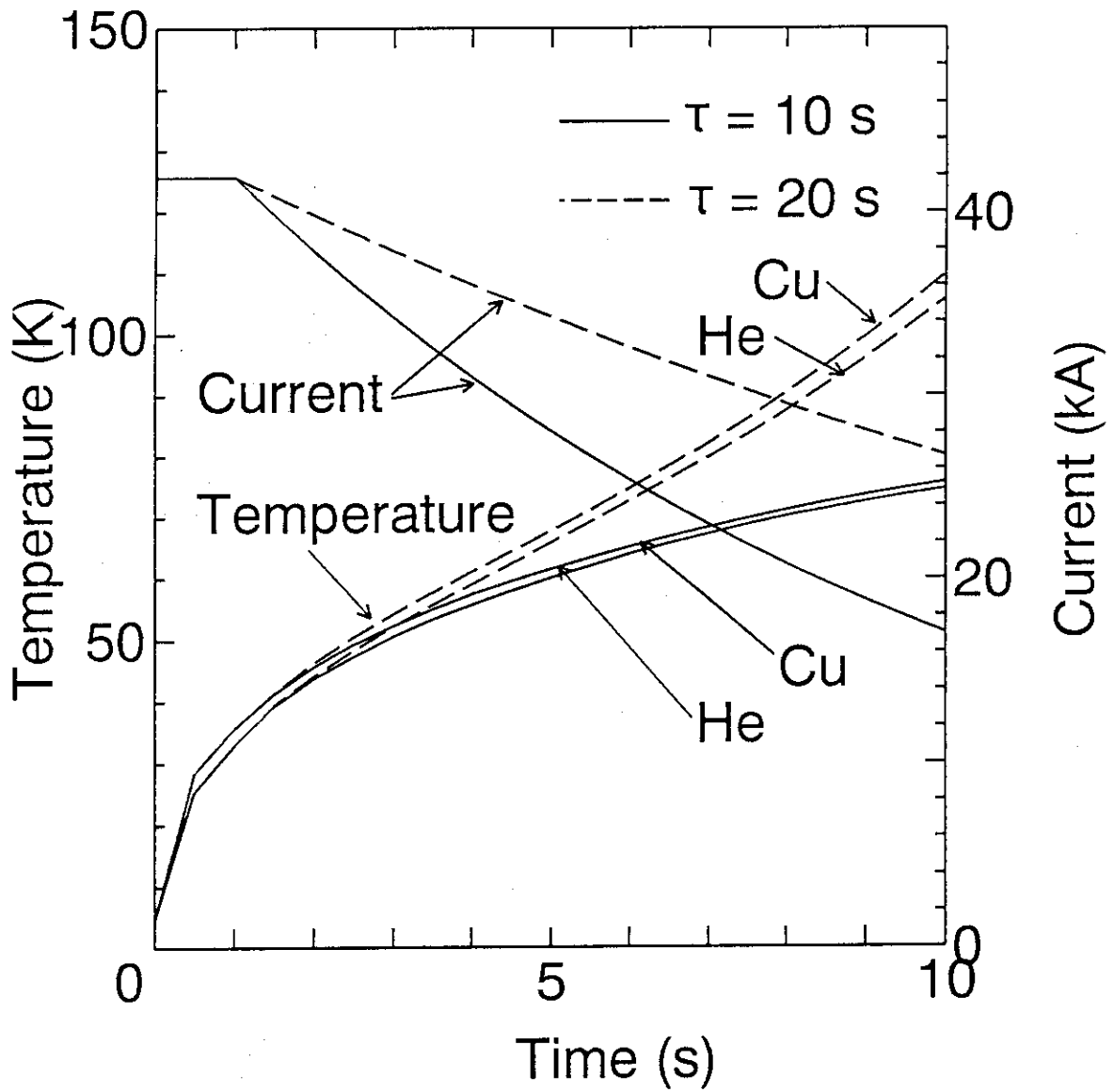


Fig. 4.3 Time dependencies of temperature of copper and helium for the damping time constant of 10 seconds and 20 seconds.

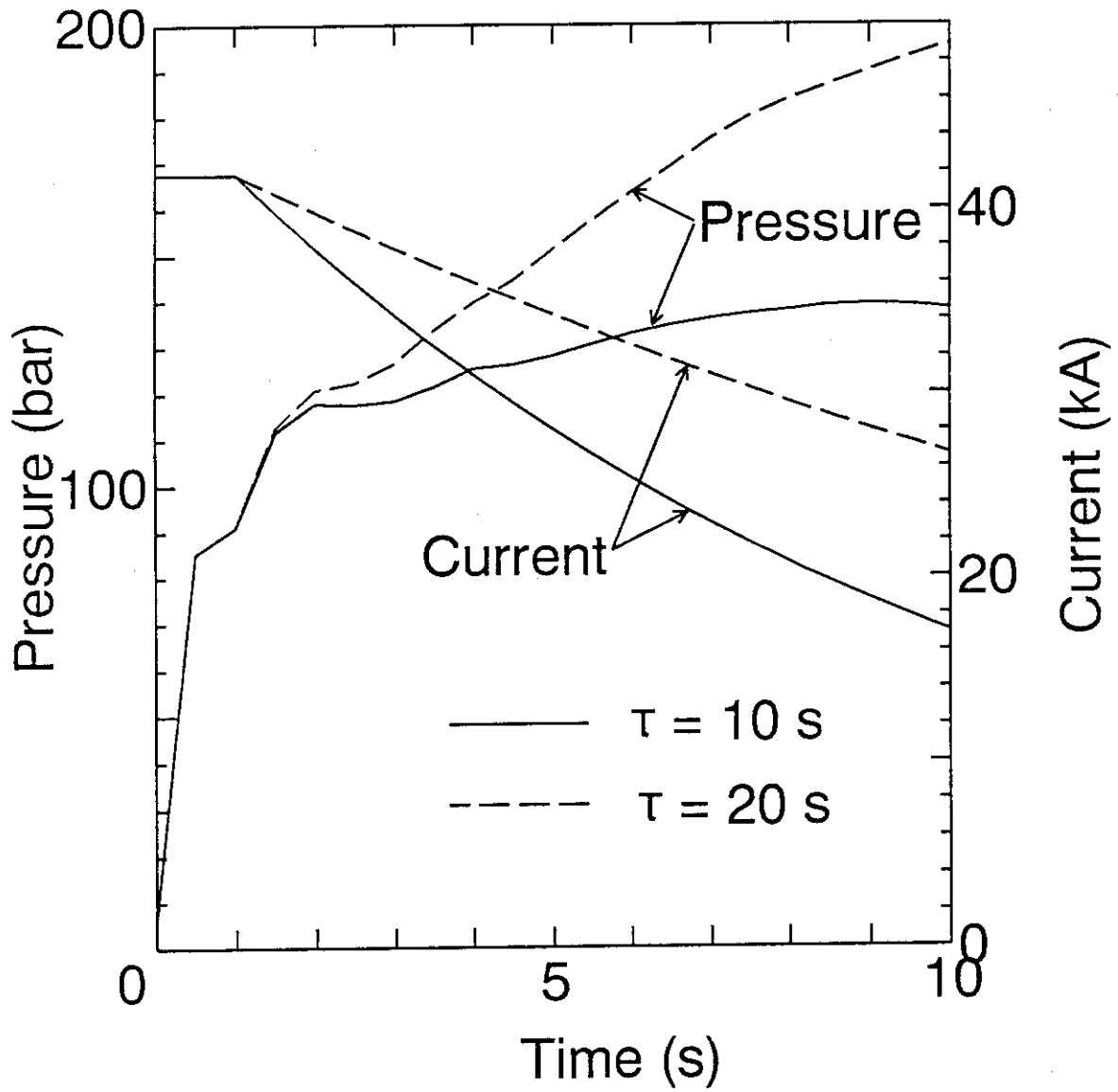


Fig. 4.4 Time dependencies of pressure for the damping time constant of 10 seconds and 20 seconds.

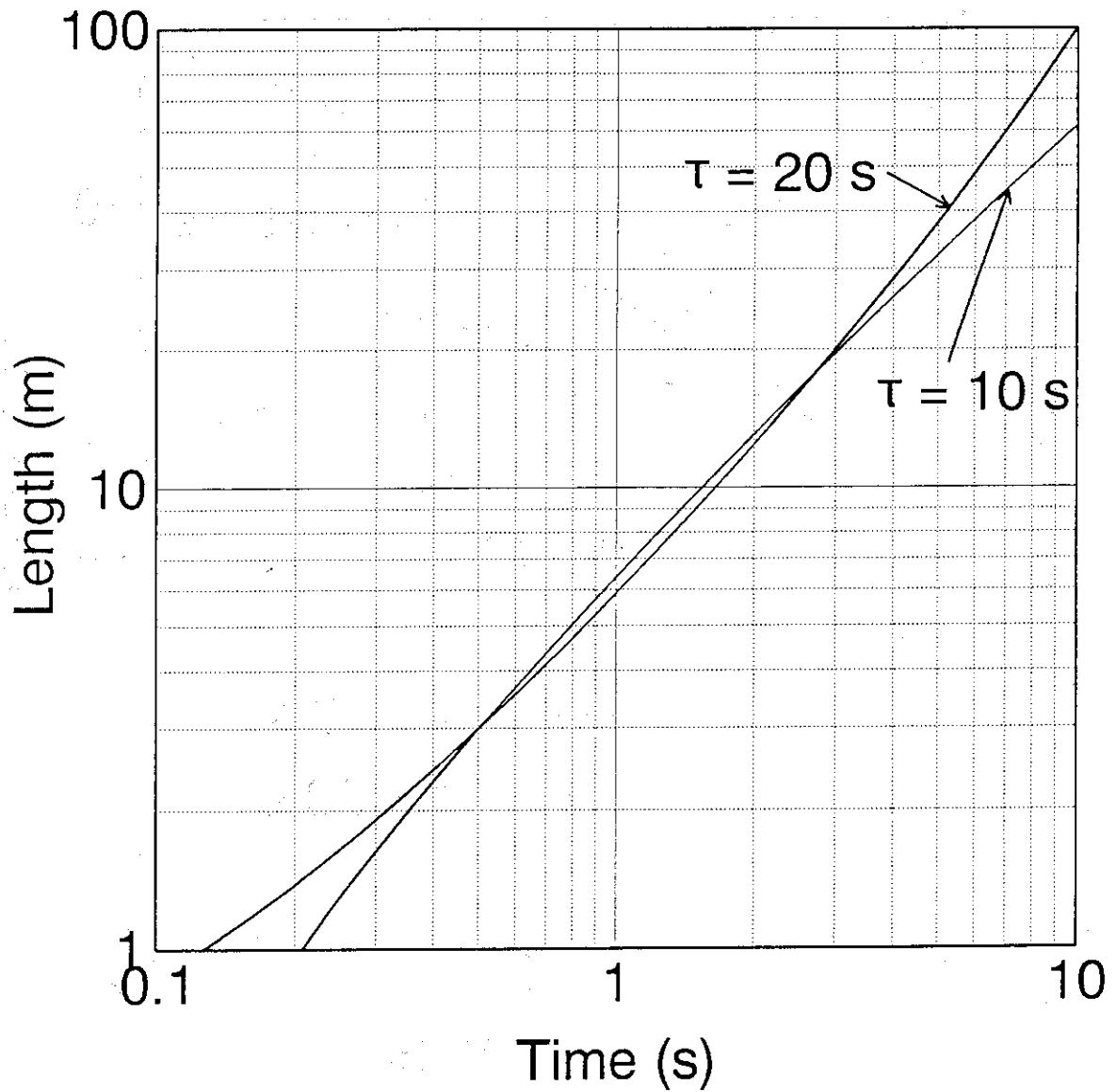


Fig. 4.5 Normal zone length vs. time for the damping time constant of 10 seconds and 20 seconds.

## 5. 結 論

強制冷却超電導コイルの安定性解析用に開発された解析コード"Q S F C"を使用して、大型強制冷却超電導コイルのクエンチ解析を数値解析により行った。実験解析により"Q S F C"によりクエンチ特性解析が行える事を実証した。数値解析では局所的クエンチの効果を検討できるため、圧力上昇は従来使用されてきたJ. Millerの式によるものより下がり、より実地的な設計が可能となった。

E D A案のI T E R用C Sコイルに対しクエンチ特性解析を行い、減衰時定数を増加させる事は圧力上昇・温度上昇とも不利であり、安定化銅を増やすなどの対策が必要であるとの結果を得た。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた島本 進部長、辻 博史超電導磁石研究室長ならびに数々の有益な助言を頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、解析にあたり協力を得た(株)原子力資料サービスの倉持勝也氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Miller, J. R., Dresner, L., Lue, J. W., Shen, S. S. and Yeh, H. T., "Pressure Rise During the Quench of a Superconducting Magnet Using Internally Cooled Conductors", Proc ICEC8 (1980) 321-329
- (2) Ando, T., Nishi, M., Hoshino, M., Oshikiri, M., Tada, E., Painter, T., Shimamoto, S., Uede, T. and Itoh, I., "Experimental Investigation of Pressure Rise of Quenching Cable-in-conduit Superconductors", Proc ICEC12 (1988) 908-912
- (3) Ando, T., Nishi, M., Kato, T., Yoshida, K., Itoh, N. and Shimamoto, S., "Propagation Velocity of the Normal Zone in a Cable-in-conduit Conductor", Adv. Cryog. Eng. 35A(1990) 701-708
- (4) 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 (1992)
- (5) Arp, V., "Thermodynamics of Single-phase One-dimensional Fluid Flow", Cryogenics 15(1975) 285-289
- (6) Benkowitsch, J. and Krafft, G., "Numerical Analysis of Heat-induced Transients in Forced Flow Helium Cooling System" Cryogenics 20(1980) 209-215

## 5. 結 論

強制冷却超電導コイルの安定性解析用に開発された解析コード"Q S F C"を使用して、大型強制冷却超電導コイルのクエンチ解析を数値解析により行った。実験解析により"Q S F C"によりクエンチ特性解析が行える事を実証した。数値解析では局所的クエンチの効果を考慮できるため、圧力上昇は従来使用されてきたJ. Millerの式によるものより下がり、より実設計的な設計が可能となった。

E D A案のI T E R用C Sコイルに対しクエンチ特性解析を行い、減衰時定数を増加させる事は圧力上昇・温度上昇とも不利であり、安定化銅を増やすなどの対策が必要であるとの結果を得た。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた島本 進部長、辻 博史超電導磁石研究室長ならびに数々の有益な助言を頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、解析にあたり協力を得た(株)原子力資料サービスの倉持勝也氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Miller, J. R., Dresner, L., Lue, J. W., Shen, S. S. and Yeh, H. T., "Pressure Rise During the Quench of a Superconducting Magnet Using Internally Cooled Conductors", Proc ICEC8 (1980) 321-329
- (2) Ando, T., Nishi, M., Hoshino, M., Oshikiri, M., Tada, E., Painter, T., Shimamoto, S., Uede, T. and Itoh, I., "Experimental Investigation of Pressure Rise of Quenching Cable-in-conduit Superconductors", Proc ICEC12 (1988) 908-912
- (3) Ando, T., Nishi, M., Kato, T., Yoshida, K., Itoh, N. and Shimamoto, S., "Propagation Velocity of the Normal Zone in a Cable-in-conduit Conductor", Adv. Cryog. Eng. 35A(1990) 701-708
- (4) 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 (1992)
- (5) Arp, V., "Thermodynamics of Single-phase One-dimensional Fluid Flow", Cryogenics 15(1975) 285-289
- (6) Benkowitsch, J. and Krafft, G., "Numerical Analysis of Heat-induced Transients in Forced Flow Helium Cooling System" Cryogenics 20(1980) 209-215

## 5. 結 論

強制冷却超電導コイルの安定性解析用に開発された解析コード"Q S F C"を使用して、大型強制冷却超電導コイルのクエンチ解析を数値解析により行った。実験解析により"Q S F C"によりクエンチ特性解析が行える事を実証した。数値解析では局所的クエンチの効果を考慮できるため、圧力上昇は従来使用されてきたJ. Millerの式によるものより下がり、より実際的な設計が可能となった。

E D A案のI T E R用C Sコイルに対しクエンチ特性解析を行い、減衰時定数を増加させる事は圧力上昇・温度上昇とも不利であり、安定化銅を増やすなどの対策が必要であるとの結果を得た。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたりご指導頂いた島本 進部長、辻 博史超電導磁石研究室長ならびに数々の有益な助言を頂いた超電導磁石研究室の諸氏に感謝の意を表します。また、解析にあたり協力を得た(株)原子力資料サービスの倉持勝也氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) Miller, J. R., Dresner, L., Lue, J. W., Shen, S. S. and Yeh, H. T., "Pressure Rise During the Quench of a Superconducting Magnet Using Internally Cooled Conductors", Proc ICEC8 (1980) 321-329
- (2) Ando, T., Nishi, M., Hoshino, M., Oshikiri, M., Tada, E., Painter, T., Shimamoto, S., Uede, T. and Itoh, I., "Experimental Investigation of Pressure Rise of Quenching Cable-in-conduit Superconductors", Proc ICEC12 (1988) 908-912
- (3) Ando, T., Nishi, M., Kato, T., Yoshida, K., Itoh, N. and Shimamoto, S., "Propagation Velocity of the Normal Zone in a Cable-in-conduit Conductor", Adv. Cryog. Eng. 35A(1990) 701-708
- (4) 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 (1992)
- (5) Arp, V., "Thermodynamics of Single-phase One-dimensional Fluid Flow", Cryogenics 15(1975) 285-289
- (6) Benkowitsch, J. and Krafft, G., "Numerical Analysis of Heat-induced Transients in Forced Flow Helium Cooling System" Cryogenics 20(1980) 209-215