

(Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルの開発

Development of (Nb, Ti)₃Sn Forced Flow Cooled Superconducting Coils

核融合用超電導マグネットには高いコイル剛性、耐電圧および安定性と低い交流損失が要求される。このように複雑で厳しい条件を満たす導体として強制冷却型超電導導体が注目され、その開発が世界的に進められている。これらの動きに対応して、このたび臨界温度が高く、高磁界特性の良い化合物系超電導材(Nb, Ti)₃Snを用いた低交流損失構造のバンドル型強制冷却導体(実規模装置の $\frac{1}{16}$ 縮小導体)を開発した。本導体を用いた小型強制冷却型コイルは、外部印加磁界10 T中で直流励磁と繰り返しパルス励磁試験を行った結果、高い熱安定性と良好なパルス励磁性能を持つことが実証された。これにより、開発した導体の大容量、長尺化を図ることによって、将来の核融合実験装置用大型超電導マグネットへの適用の可能性の見通しを得た。

飯田文雄* *Fumio Iida*
多田直文** *Naofumi Tada*
尾形久直*** *Hisanao Ogata*

1 緒 言

最近、核融合の分野でトロイダル磁場コイルおよびポロイダル磁場コイルの大型化、高磁界化の要請に伴い、超電導マグネットの研究開発の主流は浸漬(し)冷却型から強制冷却型へ移行している。その主な理由として、強制冷却型超電導コイルのいくつかの特徴を挙げることができる。

- (1) ステンレス鋼などの高剛性材料を導体コンジットとして用いることにより、導体およびコイルの巻線剛性を高め、励磁時に発生する強大な電磁力に耐える。
- (2) 強制冷却型導体は冷媒を導体内部に流すため、導体外表面を完全に絶縁で覆うことによって高い絶縁耐圧を得ることができる。これにより、クエンチ時の放電電圧を高くすることによって速やかに蓄積エネルギーを放出し、コイルを安全に保つことができる。

核融合用超電導トロイダル磁場コイルの研究開発を目的として、IEA(国際エネルギー機関)の協定に基づいて実施されたLCT(Large Coil Task)計画¹⁾では、6個のLCTコイルのうち3個までが各種の強制冷却型導体を採用し、そのコイル諸性能が調べられた。これらの実験結果は、今後の核融合用超電導コイルを設計するうえで重要な指針を与えている。現在、次期核融合実験炉として計画されているFER²⁾(日本)、TIBER³⁾(米国)、NET(ヨーロッパ連合)、ITER(日、米、欧、ソ共同研究)などのトロイダル磁場コイルおよびポロイダル磁場コイルの設計には、いずれも数種の導体構造の強制冷却型超電導コイル案が採用されている。

これらの趨(すう)勢を考慮し、今回、高磁界用超電導材料(Nb, Ti)₃Snを用いた低交流損失構造のバンドル型強制冷却導体を開発し、小型強制冷却コイルによって冷却、直流励磁およびパルス励磁試験を実施し、その性能を調べた。

本稿では(Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルの実験結果とともに、コンピュータによるクエンチシミュレーション(1次元非定常解析)との比較検討結果についても述べる。

2 実験方法

2.1 強制冷却型超電導コイル

今回開発した(Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導導体はバンドル型強制冷却導体で、その寸法・形状を図1に、仕様諸元を表1に示す。本導体(定格電流2.5 kA, 最高磁界10 T)は、将来の核融合装置用大型超電導マグネットの導体への適用を目的として開発されたもので、試験装置の制約から実機導体(定格電流40 kA, 最高磁界12 T)の $\frac{1}{16}$ 縮小モデルとした。本導体はトロイダル磁場コイル(直流運転)およびポロイダル磁場コイル(パルス運転)の両方の導体に適用できるように開発したもので、その特徴としては超電導材料として高い臨界温度を持ち、高磁界特性の良い(Nb, Ti)₃Snを採用することで高安定性を確保し、さらに交流損失を低減するために、ブロンズ中の超電導フィラメント群と安定化銅を電気抵抗の高いCuNi層とNbの拡散バリアで分割する構造としたことが挙げられる。36本の超電導より線が厚さ1.3 mmのSUS304コンジットに収

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立研究所

*** 日立製作所機械研究所 工学博士

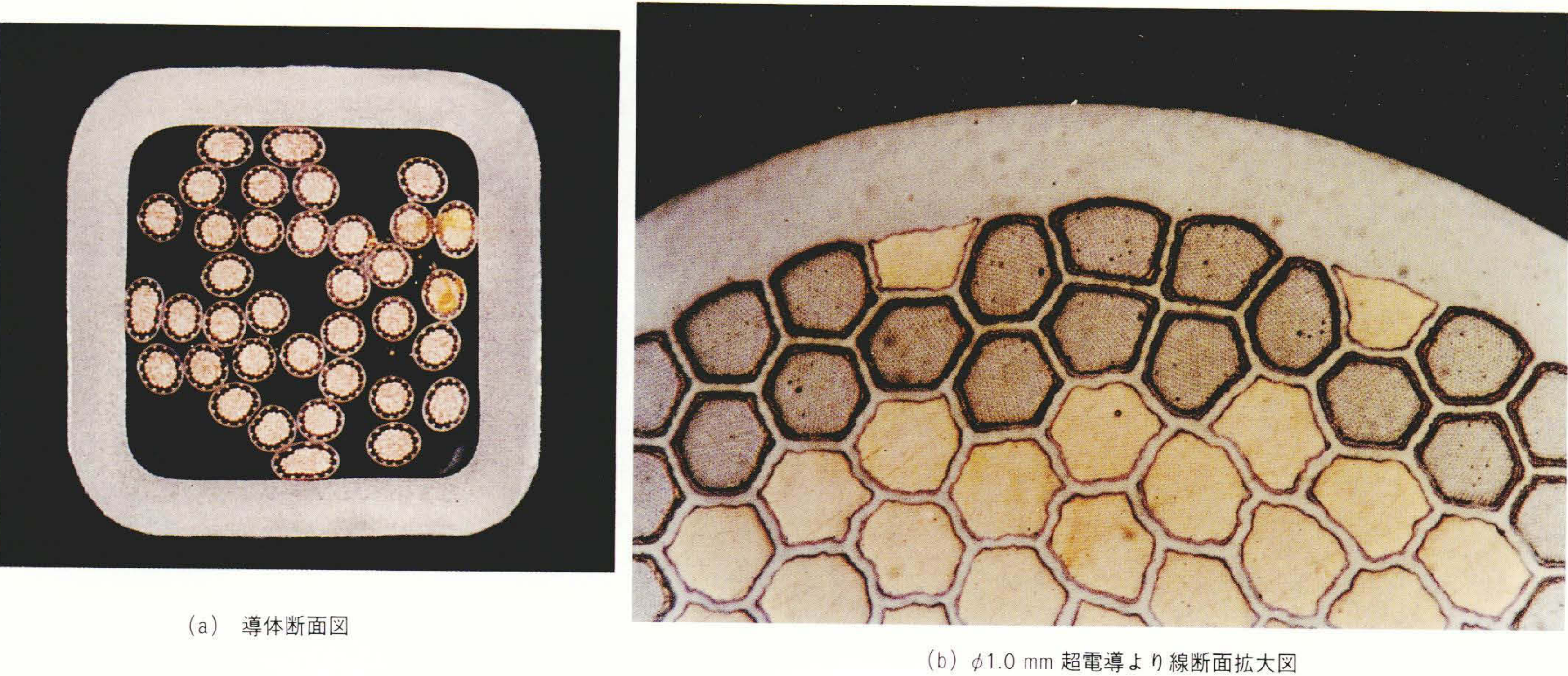


図1 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導導体の横断面 (a)は10.25 mm×10.25 mmのステンレス鋼管中に直径1.0 mmの(Nb, Ti)₃Sn超電導素線が36本より合わせた10 T級2.5 kAのバンドル導体で素線間に超臨界圧Heが強制的に流され冷却される。(b)は超電導素線拡大図でブロンズマトリックス中に直径1.42 μmの(Nb, Ti)₃Snのフィラメントが埋め込まれ、超電導部と安定化銅はCuNiとNbバリア層で分割されている。

表1 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導導体仕様諸元 バンドル型強制冷却コイルで安定性マージンの冷媒流量依存性を調べるために、ボイド率(冷媒流路断面率)の異なる導体No. 1, No. 2 を製作した。

項 目		単位	No. 1 導体	No. 2 導体
よ り 線	超電導材料	—	(Nb, Ti) ₃ Sn	(Nb, Ti) ₃ Sn
	より線径	mm	1.005	1.005
	フィラメント径	μm	1.42	1.42
	ブロンズ比	—	2.47	2.47
	銅 比	—	1.46	1.46
	より線数	—	36	36
導 体	コンジット外寸法	mm	9.69	10.25
	コンジット内寸法	mm	7.10	7.60
	ボイド率	%	39.9	46.6
体	定格電流値	kA	2.5 at 10T	2.5 at 10T
	設計臨界電流値	kA	4.68 at 10T	4.68 at 10T
	導体長さ	m	7.5	7.5

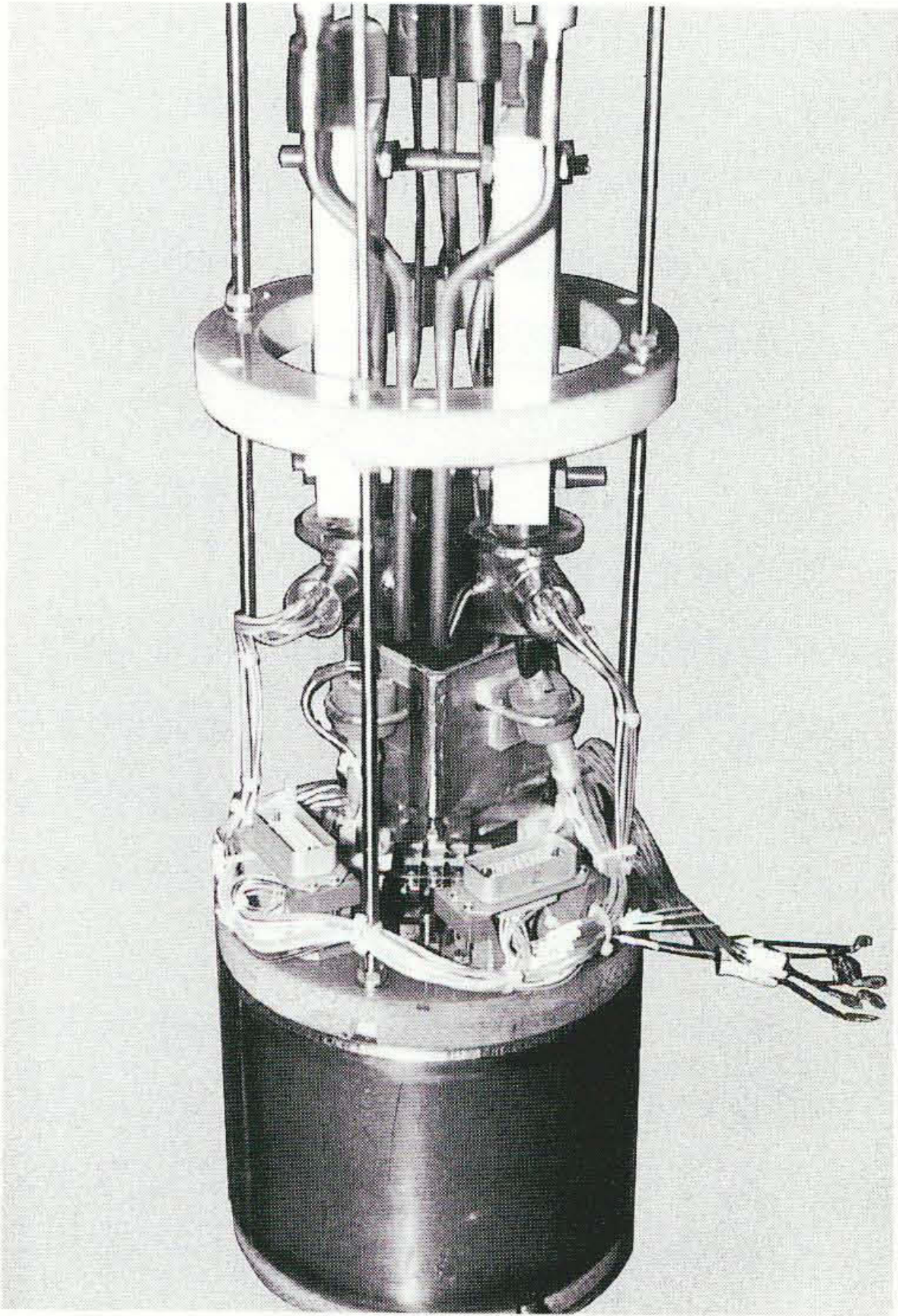


図2 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイル 図1の導体を用いた強制冷却型超電導コイルの外観を示す。コイル外周には導体と液体Heの接触を避けるために、SUS製真空断熱容器が設けられている。

2.2 強制冷却試験装置

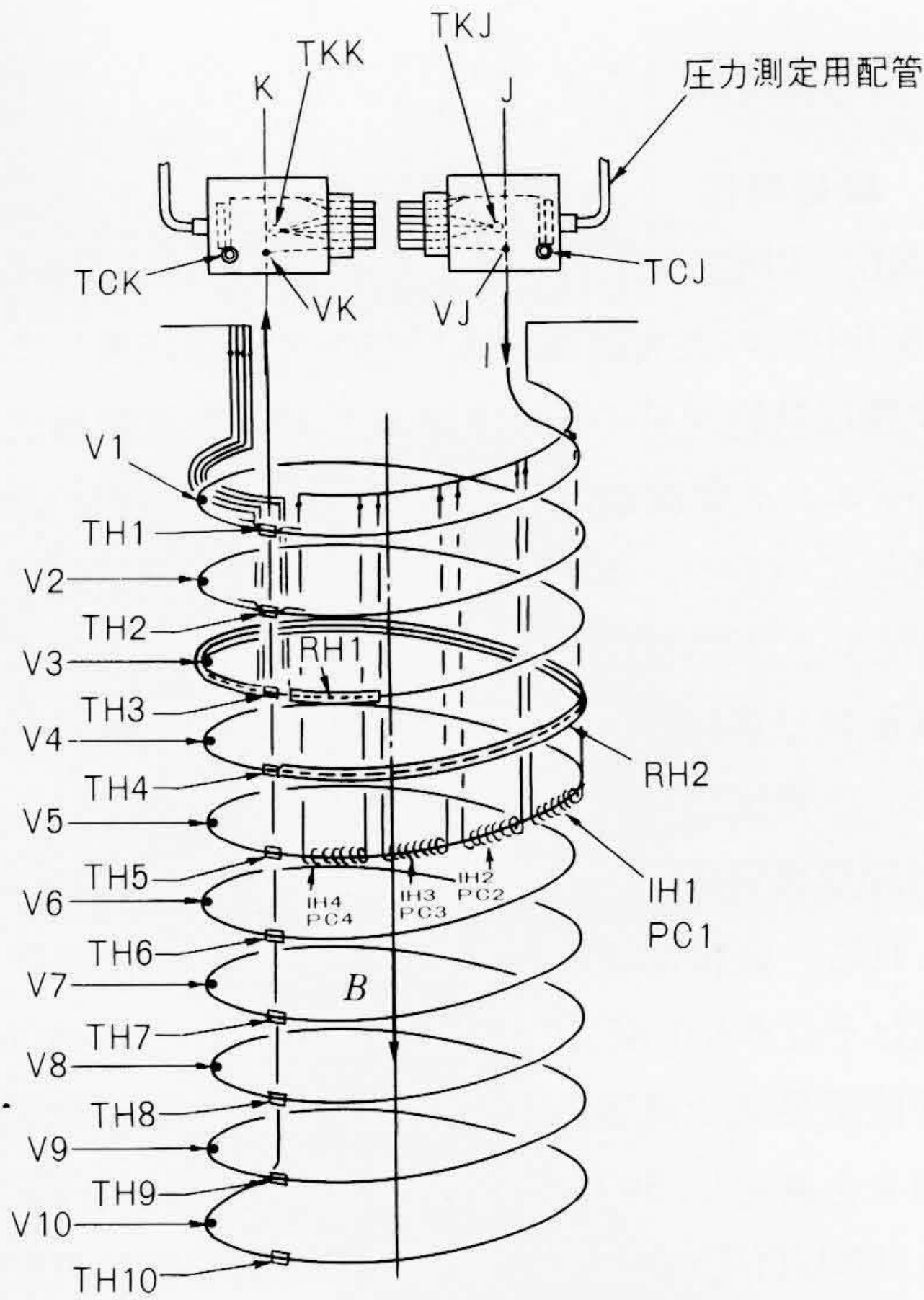
強制冷却試験装置の主な構成機器は、図4に示すようにヘリウムガス循環圧縮機(吐出し圧力1 MPa, 吐出し量1,020 Nm³/h), 超臨界圧ヘリウム発生用熱交換器(冷却能力100 W, 流量~5 g/s, 圧力0.9 MPa), トランスファチューブ,

められる構造となっている。ボイド率の導体安定性への影響を調べるために、表1に示す2種類の導体を製作した。これらの導体を用いてWind & React法によって製作した強制冷却型超電導コイルの外観を図2に、形状・寸法、主要諸元を表2に示す。コイル巻線部は直接液体ヘリウムと接触しないようにSUS製の真空断熱容器で囲まれ、図3に示すように各ターンごとに電圧タップと温度計が取り付けられ、さらに中央ターンには、安定性実験を行うための抵抗および誘導ヒータが設けられている。また、コイル両端部には冷媒の温度と圧力を測定する温度計と圧力測定用配管が設けられている。

表2 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルの仕様 表1の仕様の導体を用いた1層, 10ターンのソレノイド巻き小型強制冷却型コイルの仕様を示す。

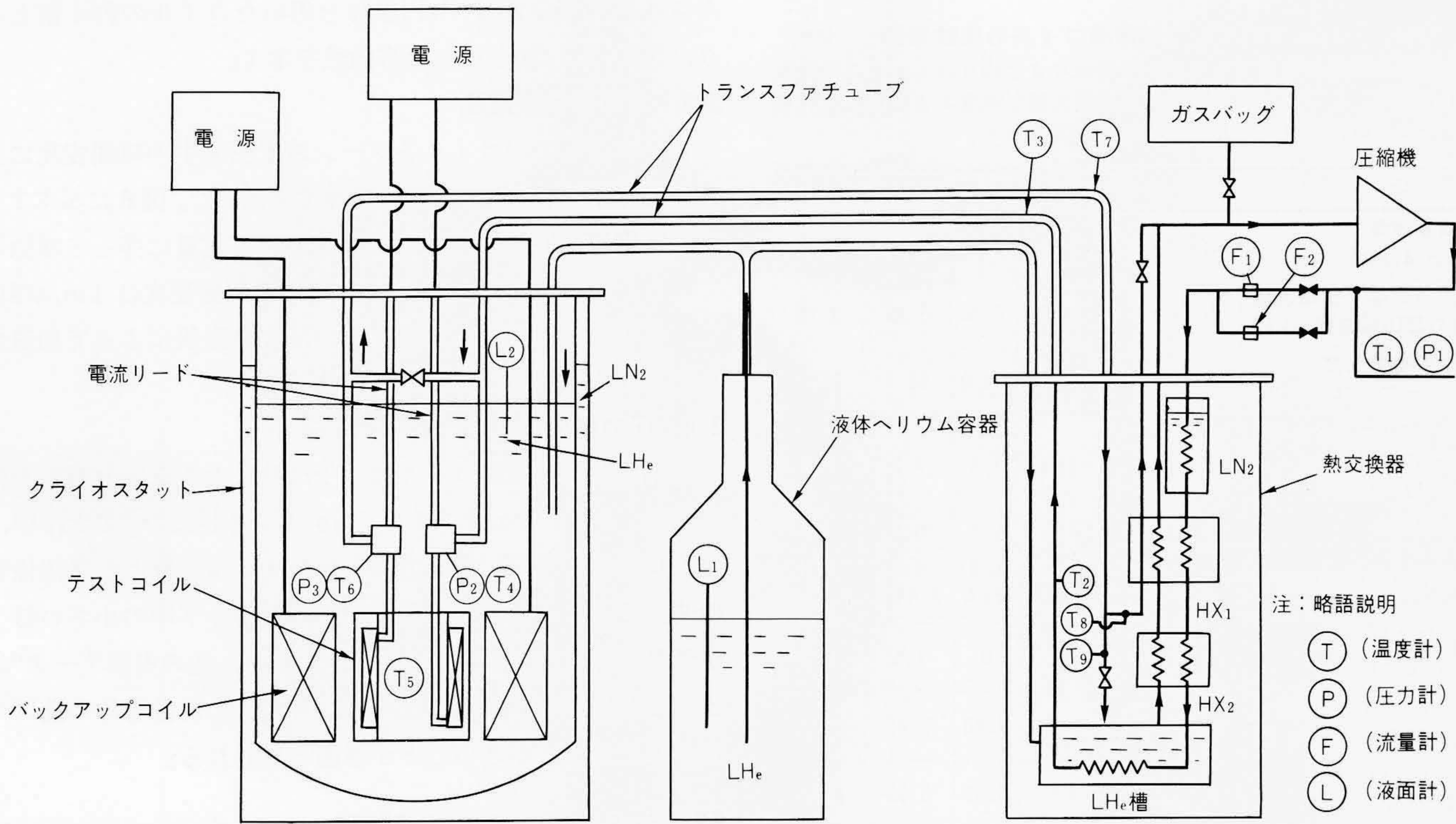
項 目	単 位	No. 1 コイル	No. 2 コイル
巻線内径	mm	180.0	180.0
巻線外径	mm	199.2	200.5
コイル軸長	mm	161.8	168.6
巻線方式	—	ソレノイド巻き	ソレノイド巻き
ターン数	ターン	10	10
導体長さ	m	7.5	7.5
最大経験磁界	T	10	10
定格電流値	kA	2.5	2.5
導体電流密度	A/mm ²	27.6	24.8
インダクタンス	μH	12	12
蓄積エネルギー	J	40	40

バックアップコイル(10 T外部印加磁界発生用), 強制冷却試験コイル, それらを取り納めるクライオスタット, 2,000 l液体ヘリウムデューワー, および電源から成り立っている。ヘリウムガスは, 圧縮機によって0.7~1.0 MPaに圧縮されて熱交換器に入り, 液体窒素槽で90~100 Kに冷却され, さらに液体ヘリウム槽で超臨界圧ヘリウムとなる。超臨界圧ヘリウムは, トランスファチューブを介してクライオスタットに入り, 強制冷却コイルを冷却する。その最大流量はコイル内の圧力損失にも関係するが, 約5 g/s, 0.6 MPaとなっている。



注: 略語説明 VJ, V1, V2, ……V10, VK (電圧タップ) TKJ, TH1, TH2, ……TH10, TCK (カーボン薄膜温度計) TCK, TCK (サーモカップル), RH1, RH2 (抵抗ヒータ) IH1, IH2, IH3, IH4 (誘導ヒータ) PC1, PC2, PC3, PC4 (ピックアップコイル)

図3 計測子配置図 強制冷却導体SUSコンジット表面にヒータ, 電圧タップ, 温度計が取り付けられ, コイル両端には温度計と圧力測定用配管が設けられている。



注: 略語説明 (T) (温度計) (P) (圧力計) (F) (流量計) (L) (液面計)

図4 強制冷却試験装置の系統図 超臨界圧Heは熱交換器で生成され8 m長のトランスファチューブでクライオスタット中の強制冷却コイルに連続的に供給される。冷媒の流量および圧力は回収側バルブで任意に設定することが可能となっている。

3 実験結果

3.1 励磁特性

(Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルは、均一外部印加磁界10 T中での直流励磁およびパルス励磁試験により、表3に示す励磁特性を持つことを実証した。直流励磁試験で本コイルのクエンチ電流値 I_q が約3 kAで、冷媒流量の増加に伴って上昇しているが、ボイド率の違いによる臨界電流値への影響は少ない。三角波繰り返しパルス励磁試験で、パルスクエンチ電流値は直流励磁と同様に冷媒流量に伴って増加し、直流クエンチ電流値より0.4 kA程度大きくなっている。これは強制冷却型導体の冷却性能が良いことに起因しているものと考えられる。定格通電(2.5 kA)までの最大変化磁界と最大掃引速度はそれぞれ0.85 T/s, 13.3 kA/sで、この値はパルス電源の性能限界値で規定されている。また、超電導素線1本の交流損失を測定し、50 Hz, 100 A交流励磁で3.3 kW/m³であり、これはNbTi/Cu/CuNi三層構造の交流用線材の交流損失の値に匹敵することを確認した。

3.2 コイル安定性

ヒータ加熱試験によって求められた本コイルの安定性限界を表す安定性曲線を図5に示す。また、比較のためにNbTi線を用いたコイルの安定性曲線も併記する。許容ヒータ入力エネルギーは冷媒流量の増加とともに大幅に増大し、ボイド率が大きいほど大きい。このことは、強制冷却型導体の安定性が超臨界圧ヘリウムの熱容量に大きく依存することを示して

表3 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルの実験結果 (Nb, Ti)₃Sn強制冷却型超電導コイルの直流励磁および繰り返しパルス励磁試験結果を示す。ここでパルス励磁特性の最大掃引速度および最大変化磁界は、パルス電源の性能容量の限界値で規定された。

	項 目	記号	単位	No. 1 コイル	No. 2 コイル		
直 流 励 磁	質量流量 (at 4.2 K)	$\dot{m}$	g/s	2.3	0	2.3	3.8
	直流クエンチ電流値 (外部印加磁界 10 T)	I_q	kA	3.05	2.86	3.04	3.15
	臨界電流密度 (ケーブルスペース)	J_c	A/mm ²	61.0	50.0	53.1	55.0
	ヒータ入力エネルギー (安定限界) at $I_d=2.5$ kA	Q	J/He cm ³	3.9	1.8	4.9	5.0
	制限電流	I_b	kA	1.2	0.5	0.8	—
	常電導領域伝搬速度	V_N	m/s	—	0.8 2 kA	4.0 2.5 kA	4.0 2.5 kA
パ ル ス 励 磁	質量流量 (at 4.2 K)	$\dot{m}$	g/s	—	0	1.5	4.5
	パルスクエンチ電流値 (外部印加磁界 10 T)	I_{qp}	kA	—	3.40	3.45	3.55
	最大変化磁界 (定格通電時)	$\dot{B}$	T/s	—	0.85	0.85	0.85
	最大掃引速度 (定格通電時)	i	kA/s	—	13.3	13.3	13.3

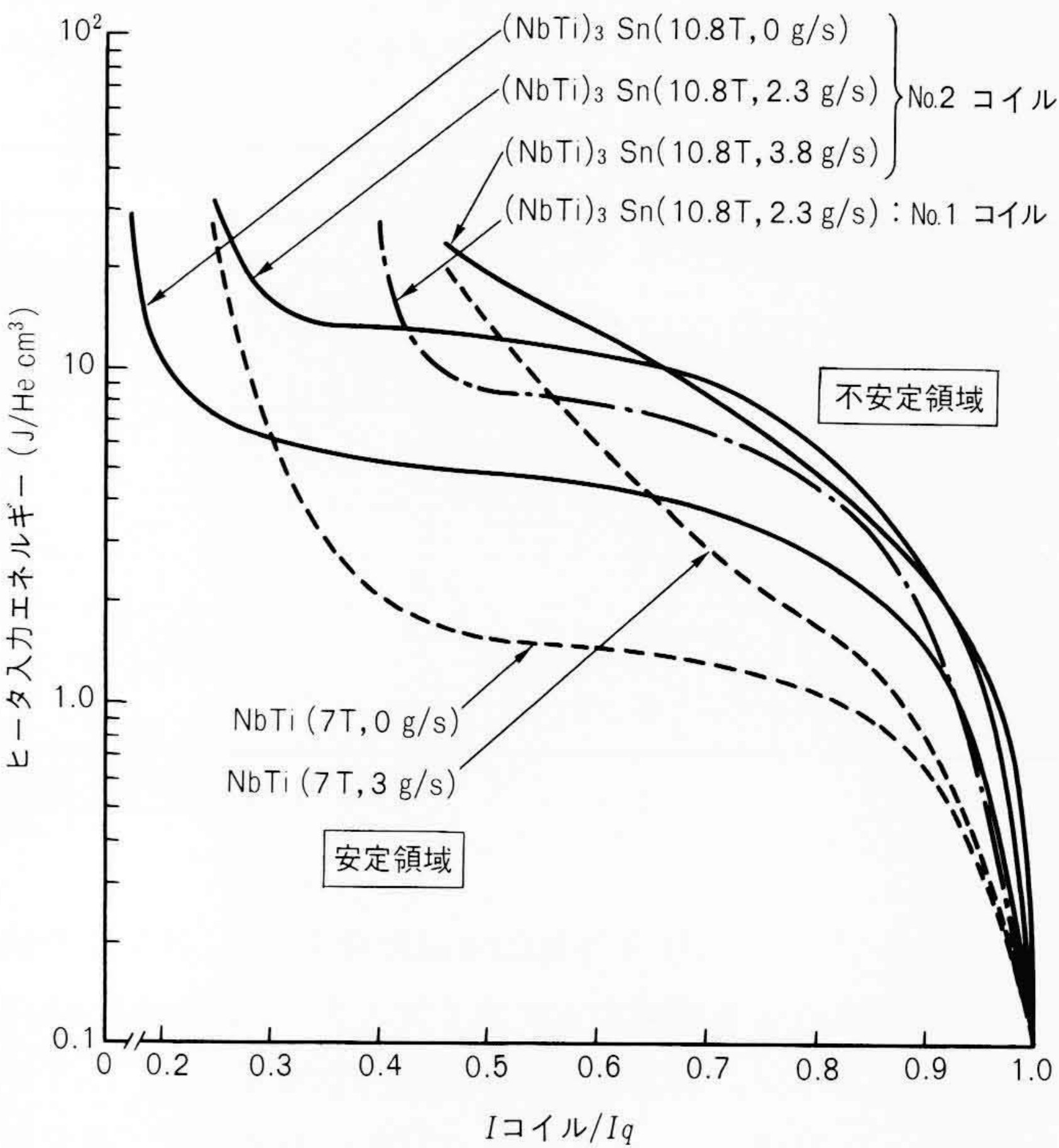


図5 安定性試験結果 横軸にコイル電流をコイルクエンチ電流で規格化したものを、縦軸に導体内の冷媒の単位体積当たりのヒータ入力エネルギーを示し、(Nb, Ti)₃Sn導体とNbTi導体の安定性マージンの差と冷媒流量依存性を示す。

いる。また、従来のNbTi線材と(Nb, Ti)₃Sn線材の安定性曲線(冷媒流量0 g/s)の違いは、超電導材料の臨界温度の差によっている。この違いを $I_{coil}/I_q=0.8$ で比較すると、今回開発したコイルの安定性はNbTi線材を用いたコイルの約4倍となり、(Nb, Ti)₃Snを用いた有効性を示す。

3.3 常電導伝搬速度

ヒータ試験でのコイル各ターンの電圧発生の変時間変化によってNo. 2 コイルの常電導伝搬速度を求めた。図6に示すように、常電導伝搬速度はコイル電流と冷媒流量に伴って増加している。定格電流値2.5 kAでの常電導伝搬速度は4 m/s程度で、常電導伝搬速度を決定するのは加熱膨脹によって加速された冷媒の伝搬速度と考えられる。

3.4 圧力損失

強制冷却型超電導コイルは、予冷時に大きな圧力損失を伴う問題がある。No. 1 コイル, No. 2 コイルについて予冷中、コイル両端で測定した圧力損失をレイノルズ数と管摩擦係数の関係でまとめたものを図7に示す。ボイド率の小さいほうが管摩擦係数は大きくなっている。また、他の実験データ⁴⁾に比べて摩擦係数が大きくなっているが、これは導体の曲げ半径が他に比べて小さいことが原因と思われる。

4 シミュレーション解析

強制冷却型超電導コイルの安定性試験と同時に、1次元非

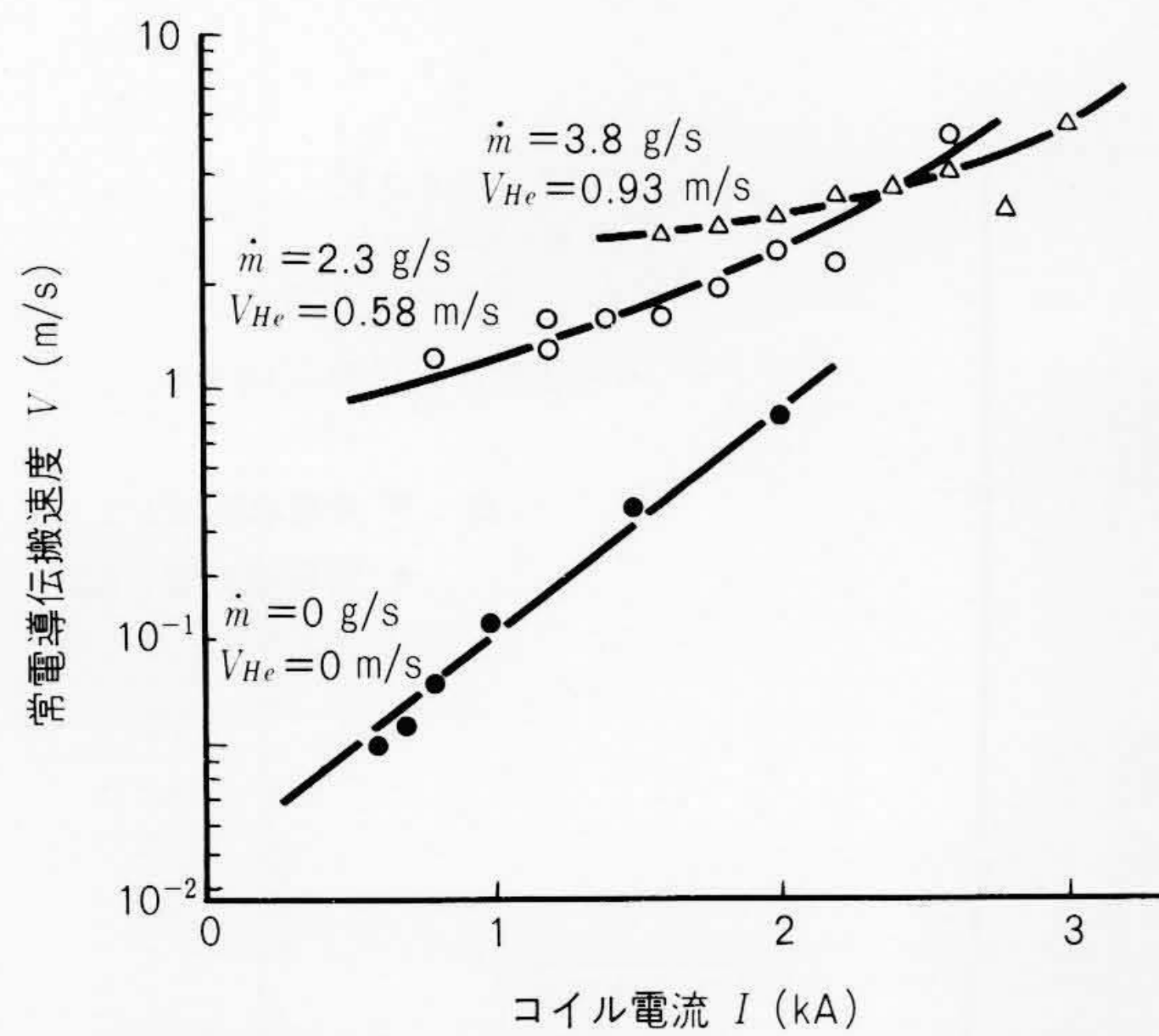


図6 常電導伝搬速度(No. 2 コイル) バンドル型強制冷却超電導コイルの常電導伝搬速度をコイル電流と冷媒流量の関係でプロットしたものである。

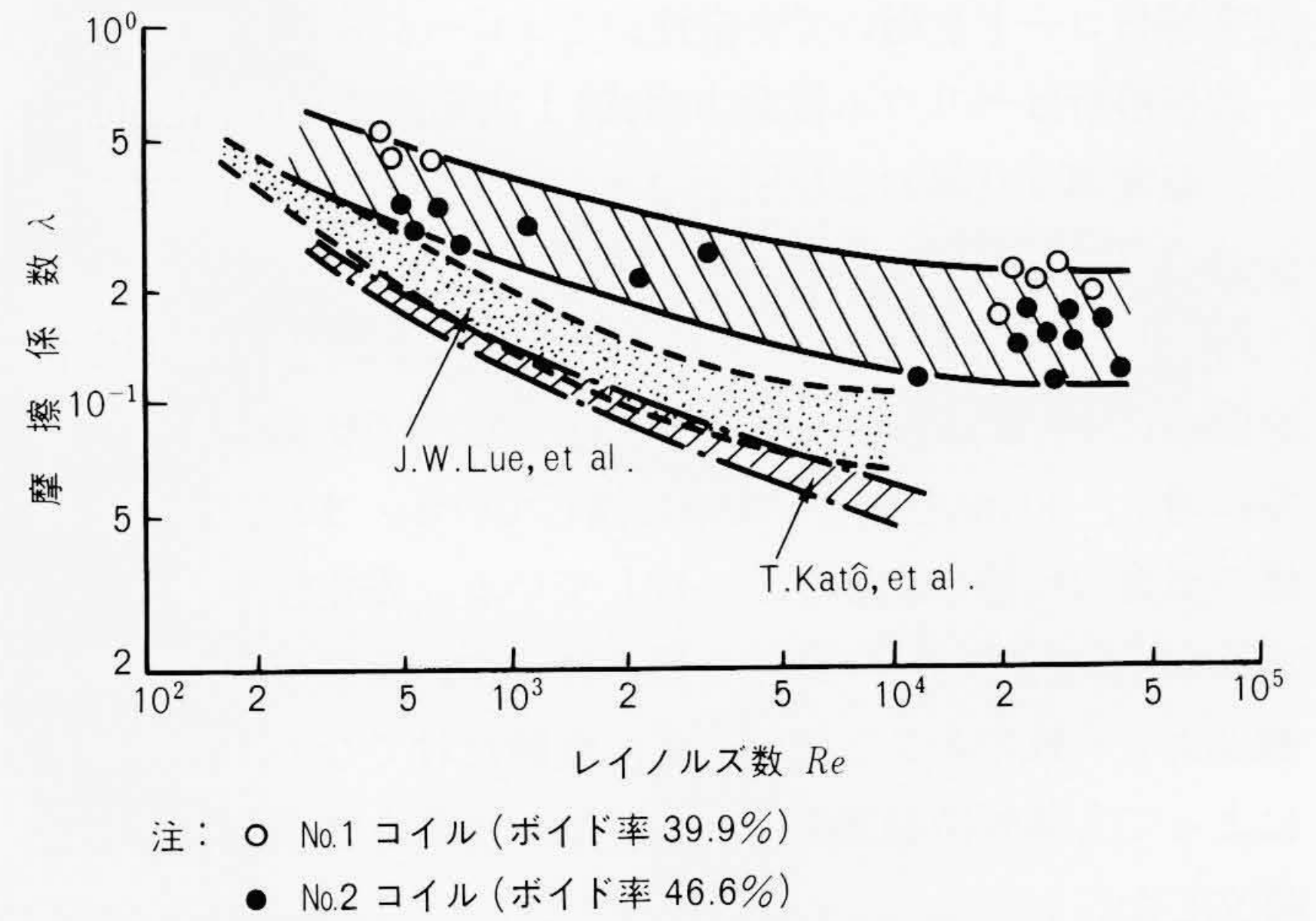


図7 強制冷却型超電導コイルの摩擦係数 No. 1 および No. 2 コイルの摩擦係数を室温, LN₂, LHe の温度領域で測定したもので, 他の実験データに比べ少し大きな値となっている。

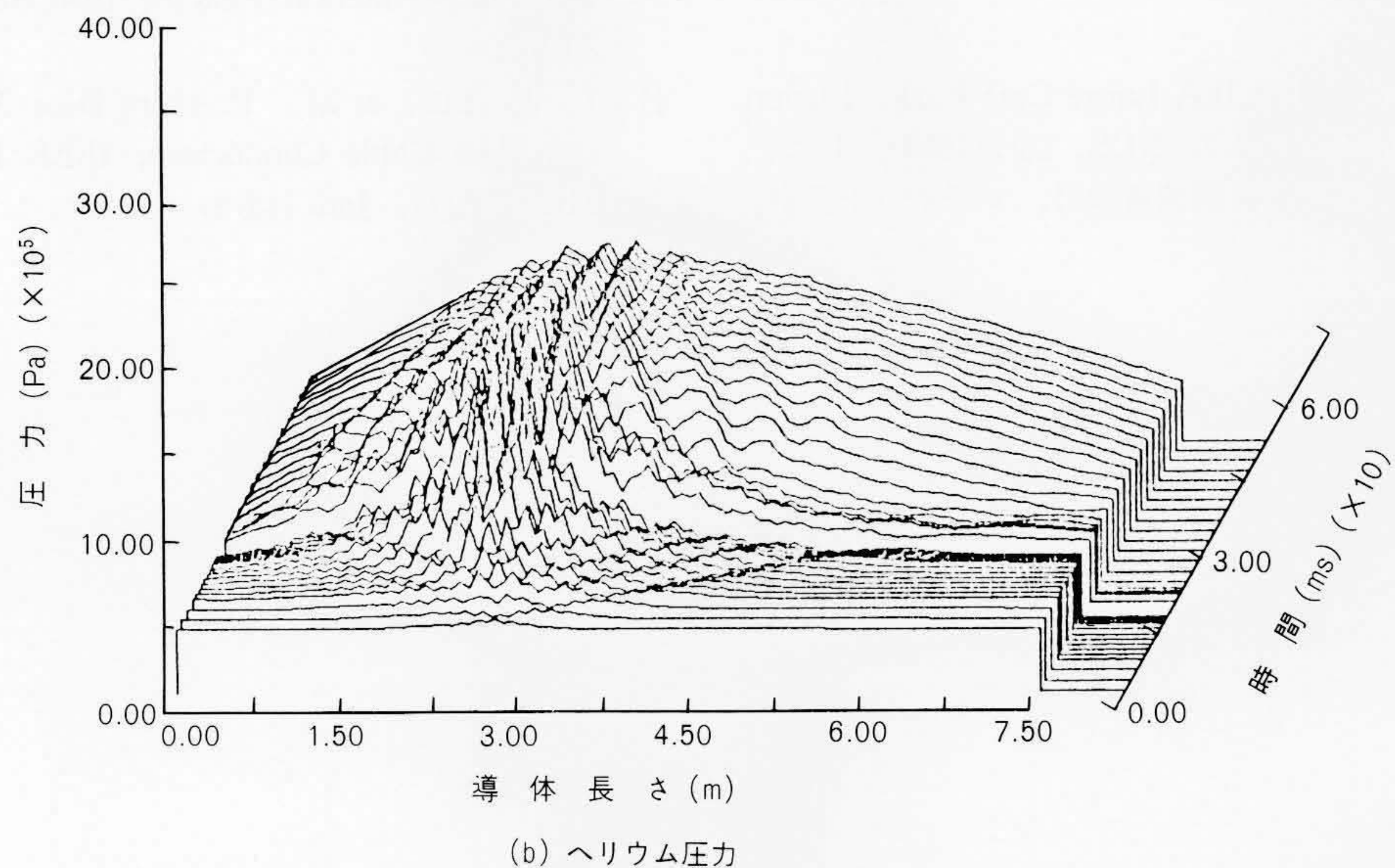
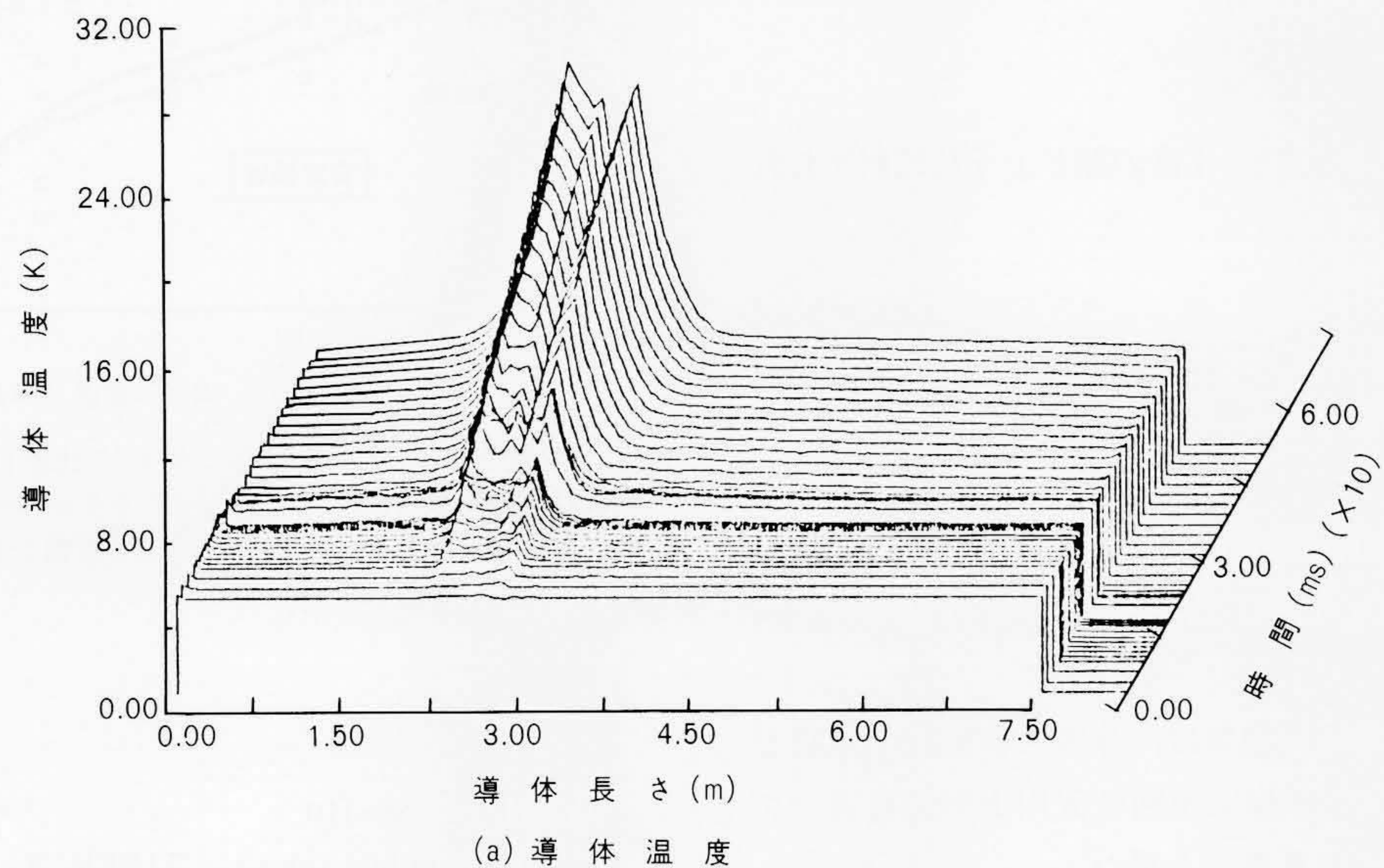


図8 クエンチシミュレーション解析結果 クエンチ初期での強制冷却コイルの(a) 導体温度, (b) ヘリウム圧力の成長, 変動の詳細を示す。

定常解析コードを用いて安定性シミュレーションを実施した。

数値解析はヘリウム流動方程式(1次元非定常圧縮性流れ)と、超電導より線およびSUSコンジットの熱伝導方程式を差分法で解いている。

導体長さ方向の導体温度とヘリウム圧力の分布の時間変化を図8に示す。圧力変動の伝搬は導体温度の伝搬に比べて非常に速く、30 msでコイル両端に達している。また、導体と冷媒の温度の伝搬挙動はよく一致している。安定性マージンの実験と数値計算結果の比較を図9に示す。実験曲線と計算曲線はよく一致することを確認し、実験だけでなく、数値解析によっても強制冷却型超電導コイルの現象を解明する手段を確立した。

5 結 言

核融合用超電導マグネットに適用するために、(Nb, Ti)₃Snバンドル型強制冷却導体を開発し、小型強制冷却コイルで以下に述べる性能を確認した。

(1) 高熱安定性

従来のNbTi線材に比較して、4倍の熱じょう乱に耐えられる高い熱安定性を持つ。

(2) 高速励磁

10 T磁場中で、定格電流値まで13 kA/s(0.85 T/s)の高速繰り返しパルス励磁が可能である。

(3) 低交流損失

超電導・素線の交流損失は50 Hz、100 A励磁で3.3 kW/m³であり、これはNbTi/Cu/CuNi三層構造の交流用線材の交流損失に匹敵する。

本開発の強制冷却型超電導導体は、今後大容量・長尺化を図ることによって、将来の核融合実験装置用大型超電導マグネットへの適用の可能性の見通しを得た。

参考文献

- 1) D. S. Beard, et al.: The IEA Large Coil Task, Fusion Engineering and Design Vol.7, NOS. 1&2(1988), 1-232
- 2) 日本原子力研究所: 核融合次期装置設計, マグネット設計,

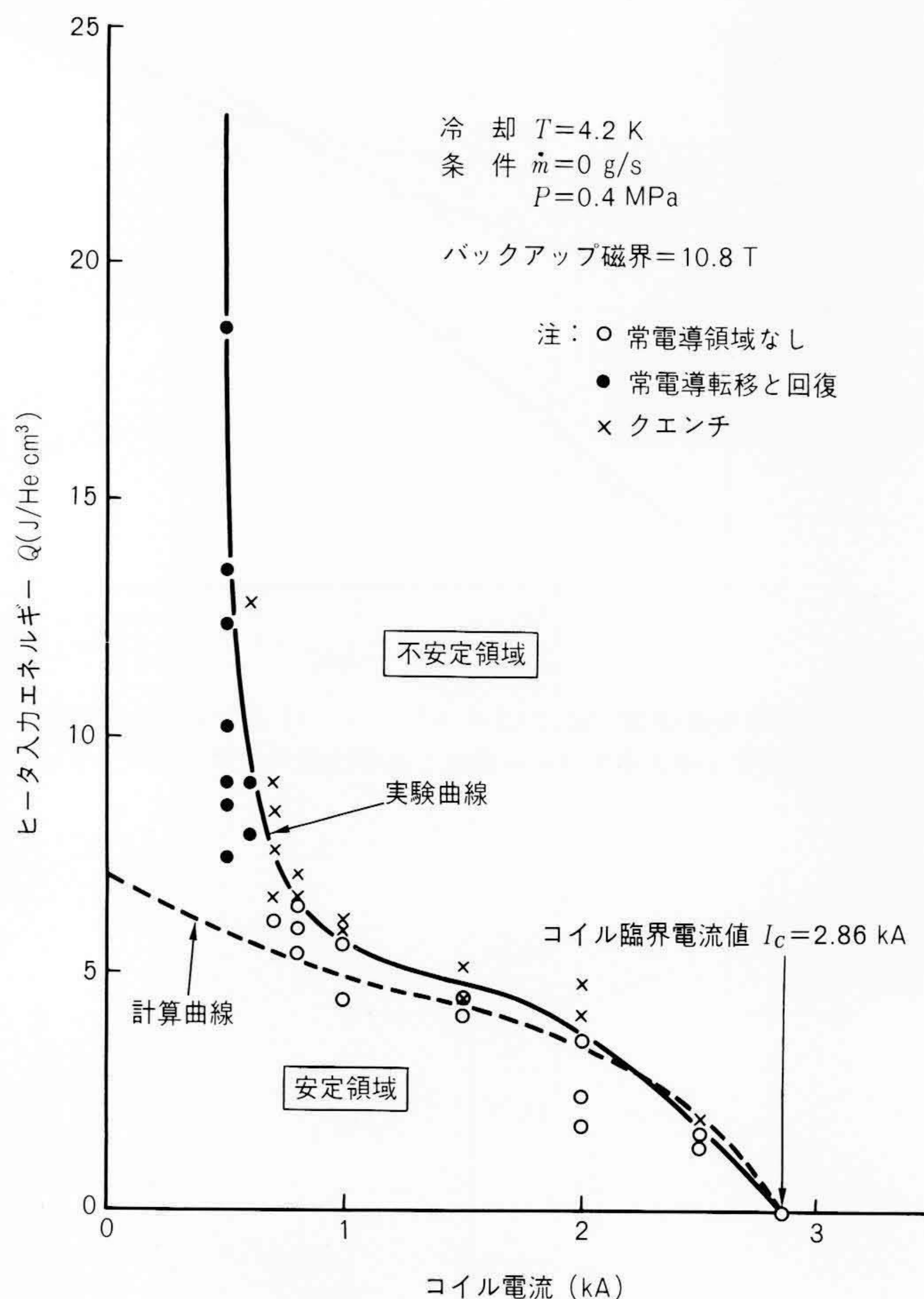


図9 実験とシミュレーション解析の比較(安定性マージン)
実線は実験結果を、破線はクエンチ シミュレーション解析結果を示す。
この一致によって解析コードの正当性確認した。

JAERI-M, 88-110

- 3) C. D. Henning, et al.: TIBER II, Tokamak Ignition/Burn Experimental Reactor 1986 Status Report, UCID-20863
- 4) J. W. Lue, et al.: Pressure Drop Measurement on Forced Flow Cable Conductors, IEEE Trans. Magn., Vol. MAG-15(1), Jan.(1979)