



JT-60電源を用いたITER中心ソレノイドモデルコイルの
パルス通電試験

2001年 8月

寺門 恒久・岡野 潤・島田 勝弘・三浦 友史・山下 瞳樹・松川 誠
細金 延幸・辻 博史・安藤 俊就*・高橋 良和・中嶋 秀夫・加藤 崇
檜山 忠雄・杉本 誠・磯野 高明・河野 勝己・小泉 徳潔・濱田 一弥
布谷 嘉彦・松井 邦浩

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60 電源を用いた ITER 中心ソレノイドモデルコイルのパルス通電試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

寺門 恒久・岡野 潤・島田 勝弘・三浦 友史・山下 瞳樹・松川 誠・細金 延幸
辻 博史⁺¹・安藤 俊就*・高橋 良和⁺²・中嶋 秀夫⁺¹・加藤 崇⁺¹・檜山 忠雄⁺¹
杉本 誠⁺¹・磯野 高明⁺¹・河野 勝己⁺¹・小泉 徳潔⁺¹・濱田 一弥⁺¹・布谷 嘉彦⁺¹
松井 邦浩⁺¹

(2001年7月6日受理)

国際熱核融合実験炉（ITER）の工学設計活動の一つとして、中心ソレノイド（CS）モデルコイルの開発が、日本、欧州連合、ロシア及び米国の共同で1992年から開始された。CSモデルコイルの通電試験は、日本原子力研究所那珂研究所の試験設備を用いて、国際共同実験チームにより行われた。通電試験には、直流通電試験とパルス通電試験があり、このうち直流通電試験は超電導磁石研究室の低電圧電源を用いた。一方、パルス通電にはJT-60のポロイダル磁場コイル電源を使用した。本レポートは、このパルス通電を行うために実施したJT-60ポロイダル磁場コイル電源の改造や、制御特性改善のためのリアルタイム制御手法の改良、及び得られた試験結果について報告する。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+1 核融合工学部

+2 平成13年4月からITER開発室

* 平成13年4月から日本アドバンスドテクノロジー（株）

Pulse Operation Test of the ITER Central Solenoid Model Coil using the JT-60 Power Supply

Tsunehisa TERAKADO, Jun OKANO, Katsuhiro SHIMADA, Yushi MIURA,
Yoshiki YAMASHITA, Makoto Matsukawa, Nobuyuki HOSOGANE, Hiroshi TSUJI⁺¹,
Toshinari ANDO*, Yoshikazu TAKAHASHI⁺², Hideo NAKAJIMA⁺¹, Takashi KATO⁺¹,
Tadao HIYAMA⁺¹, Makoto SUGIMOTO⁺¹, Takaaki ISONO⁺¹, Katsumi KAWANO⁺¹,
Norikiyo KOIZUMI⁺¹, Kazuya HAMADA⁺¹, Yoshihiko NUNOYA⁺¹ and Kunihiro MATSUI⁺¹

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

(Received July 6, 2001)

As one of the Engineering Design Activities (EDA) of ITER, the development of the ITER Central Solenoid (CS) Model Coil was started in cooperation with United State, Russia, Europe (EU) and Japan since 1992. Tests of the CS Model Coil was carried out by the international joint experiment team, using the test facility of Naka Fusion Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). DC operation tests and pulse operation tests were carried out. The former was carried out using a low-voltage power supply of the superconducting magnet laboratory and the latter was carried out using the poloidal field coil power supply of JT-60. This paper reports the modification of the poloidal field coil power supply for the pulse operation tests of the CS Model Coil, the modification of the real-time control to improve the characteristics of the power supply and results of the pulse operation test.

Keywords: Pulse Operation, CS Model Coil, Poloidal Field Coil Power Supply, Superconducting Coil

+1 Department of Fusion Engineering Research

+2 Department of ITER Project (From April, 2001)

* Japan Advanced Technology Co., Ltd. (From April, 2001)

目 次

1. CS モデルコイル開発計画の概要	1
2. パルス通電試験のための JT-60 ポロイダル磁場コイル電源の改造	3
2.1 P-MG の長時間運転	5
2.2 計算機システムの対応	6
2.3 接地抵抗器	8
2.4 バイパススイッチ	9
3. 試験結果	11
3.1 CS モデルコイルの高周波特性測定	11
3.2 電流制御特性の予備検討	15
3.3 5 月の通電試験	18
3.4 電流立下げ制御の改善	19
3.5 7 月の通電試験	19
4. まとめ	21
謝 辞	21
参考文献	21
付録 A. CS モデルコイルのパルス通電試験データ	22

Contents

1. Outline of CS Model Coil Development Programs	1
2. Modification of JT-60 Poloidal Field Coil Power Supply for Pulse Operation Tests	3
2.1 Long-time Operation of the Motor Generator for the Poloidal Field Coil Power Supply	5
2.2 Improvement of the Computer System for Pulse Operation Tests	6
2.3 Earthing Resistor	8
2.4 By-pass Switch	9
3. Test Results	11
3.1 High Frequency Characteristics of the CS Model Coil	11
3.2 Operation of the Current Control Characteristics	15
3.3 Pulse Tests in May, 2000	18
3.4 Improvement of the Current Control in the Current Ramp-down Phase	19
3.5 Pulse Tests in July, 2000	19
4. Summary	21
Acknowledgments	21
References	21
Appendix A. The Data in Pulse Tests of the CS Model Coil	22

1. CS モデルコイル開発計画の概要

ITER 計画は、1985 年に開催された米ソ首脳会談を契機にスタートしたものである。日本、欧州連合(EU)、ロシア、米国の 4 極が参加して、1988 年から 3 年間概念設計活動 (CDA) が行われた。1992 年からは、ITER 建設に関する将来の決定のために必要なすべての技術情報を整えることを目的として、工学活動設計 (EDA) が開始された。EDA の第 1 の柱は機器設計であり、第 2 の柱は大規模な試作開発を行って、主要コンポーネントの技術的な成立性を確認することである（工学 R&D）。また、第 3 の柱として、4 極のプラズマ実験装置を用いたプラズマに関する研究開発（物理 R&D：ボランタリーベース）がある。

中心ソレノイド (CS)・モデルコイルの開発は、工学 R&D の中でも最も大きな項目の一つである。製作は 4 極で分担して行うが、試験は日本原子力研究所那珂研究所で行うこととなった[1]。すなわち、実証試験を行うための、冷凍・真空系、電源系及び計測系から構成される試験設備の整備が、那珂研究所で行われた。そして、JT-60 のポロイダル磁場コイル電源 (P 電源) がパルス通電試験に使用されることになった。

1998 年には、「CS モデルコイルの据付及び実験に係る安全性について」那珂研究所の一般施設等安全審査が行われ、安全性は十分に確保できることが確認された。1999 年には、強磁場環境における実験や作業を安全に実施するため、「磁場環境における安全基準のガイドライン」が作成され、安全管理の指針が確立された。

P 電源では、1993 年から 1994 年にかけて、CS モデルコイルの試験に必要な運転パターンを実現させるため、計算機システムの改造及び長時間運転のための改造を実施した。1996 年には当該設備を使用して、当初計画になかった超電導電力貯蔵コイル (SMES) [2] の通電試験を実施し、貴重な経験を得た。すなわち、通常の JT-60 より長いパルス運転を安定かつ安全に行つた[3]。さらに、1999 年、2000 年には通電容量を越えることになる一部の機器について、安全対策を実施した。

CS モデルコイルの据付作業は 1999 年 10 月末に完了し、11 月末には初期冷凍を開始した。しかし、12 月末にヘリウム・リークが発生したため一度昇温の後、当該箇所の修理を行つた。2000 年 3 月から冷却を開始した。性能確認試験は、4 月から 8 月まで実施し、P 電源を使用したパルス通電試験は、5 月に 5 日間、7 月に 10 日間実施した。表 1 に、CS モデルコイル開発計画の経緯をまとめた。

表1 CS モデルコイル開発計画の経緯

実施年	主要イベント	実施主体
1988 年	概念設計活動 (CDA) 開始	日・米・欧・ロ
1991 年	パルス試験の通電可能パターンの検討	JT-60 第 1 試験室
1992 年	工学設計活動 (EDA) 開始	日・米・欧・ロ
同年 4 月	CS モデルコイル開発に着手	日・米・欧・ロ
1993,4 年	JT-60 P 電源 運転・放電系計算機の改造	JT-60 第 1 試験室
1994 年	JT-60 P 電源 長時間化改造	JT-60 第 1 試験室
1995 年 9 月	直流遮断器試験のための送電	超電導磁石研究室 JT-60 第 1 試験室
1996 年 7 月	超電導電力貯蔵コイル(SEMS)への送電	超電導磁石研究室 JT-60 第 1 試験室
1998 年 5 月	JT-60 電源を用いた ITER CS モデルコイル実験の打合せ	超電導磁石研究室 炉心プラズマ計画室 JT-60 第 1 試験室
同年 5 月 - 8 月	「CS モデルコイルの据付及び実験に係る安全性について」の所内安全審査	超電導磁石研究室
1999 年 3 月	JT-60 P 電源 接地抵抗器の設置	JT-60 第 1 試験室
同年 3 月	磁場環境における安全管理指針制定 (磁場環境における安全基準のガイドライン)	那珂研究所
同年 10 月末	CS モデルコイル据付完了	超電導磁石研究室
同年 11 月末	初期冷凍開始	超電導磁石研究室
同年 12 月末	20K ヘリウム・リーク発生、修理	超電導磁石研究室
2000 年 1 月	JT-60P 電源 バイパススイッチの設置	JT-60 第 1 試験室
同年 3 月	2 回目の冷凍開始	超電導磁石研究室
同年 4 月 - 8 月	直流通電試験	超電導磁石研究室
同年 5, 7 月	パルス通電試験	超電導磁石研究室 JT-60 第 1 試験室

2. パルス通電試験のための JT-60 ポロイダル磁場コイル電源の改造

図1にJT-60 ポロイダル磁場コイル電源（P電源）の構成図を示す。P電源は、JT-60本体のポロイダル磁場コイル構成に対応したサイリスタ電源5セットと、エネルギー蓄積のための電動発電機（P-MG）から構成される。P-MGからは、空心変流器コイル電源（PSF）、垂直磁場コイル電源（PSV）、四重極磁場コイル電源（PSQ）、水平磁場コイル電源（PSH）へ交流電力を供給している。また、ダイバータコイル電源（PSM）及び境界プラズマ層制御電源（PSEX）は、加熱用発電設備の電動発電機（H-MG）から供給している。P-MGは、発電機容量が500MVAで放出エネルギー1.3GJ、出力電圧18kVで約22秒の励磁が可能である。H-MGは、発電機容量が400MVAで放出エネルギー2.6GJ、出力電圧18kVで、連続励磁できる。このうち、超伝導コイルへの通電は、両極性電源であるPSF及び高電圧を発生できるPSVを選択した。

図2にCSモデルコイルの鳥瞰図を、表2にCSモデルコイルの定格を示す。CSモデルコイルのパルス通電は、図3に示すようなパターンを想定した。電流46kAで立上げ、立下げを含めた通電時間は70秒である。しかし、PSF及びPSVのサイリスタ変換器は、それぞれ±120kA、+60kAにおいて通電時間は15秒である。従って、70秒通電を行うために、MGの励磁時間も含めた改造を行った。CSモデルコイルの自己インダクタンスは、JT-60のポロイダル磁場コイルより数十倍大きい0.6Hである。従って、蓄積エネルギーも数倍大きくなり、電源機器の通電容量を正確に評価した。問題となった機器についても改造等の対策を行って対処した。

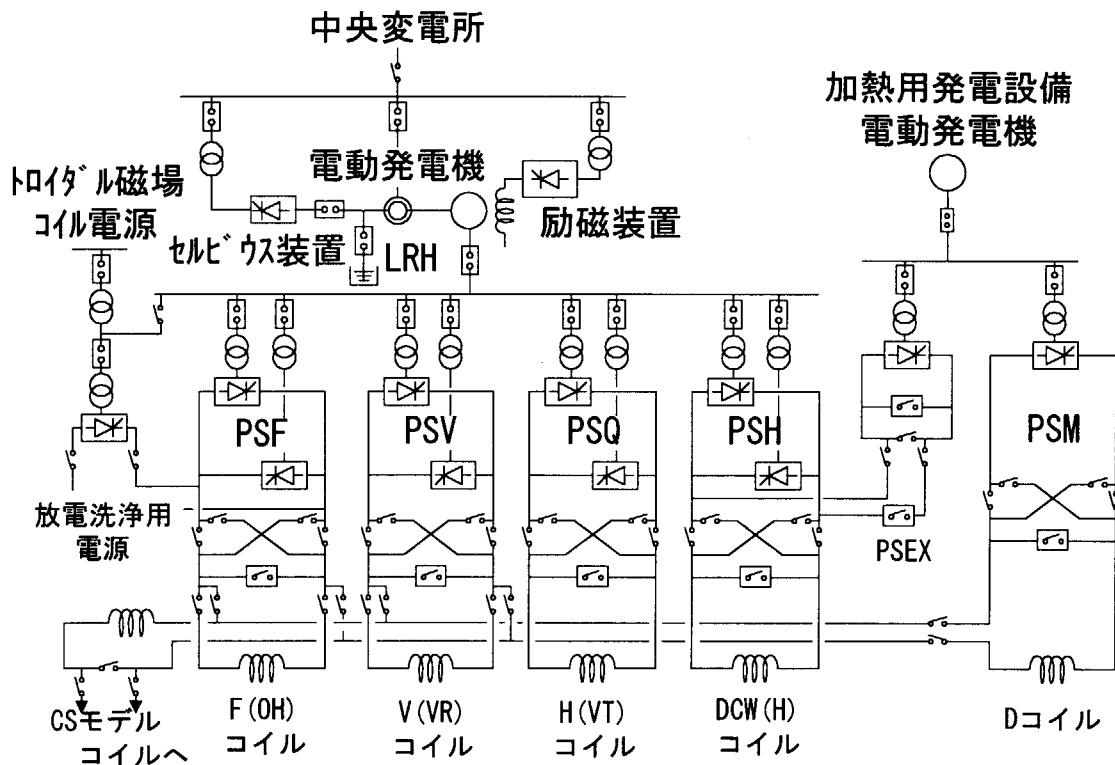


図1 P電源の構成図

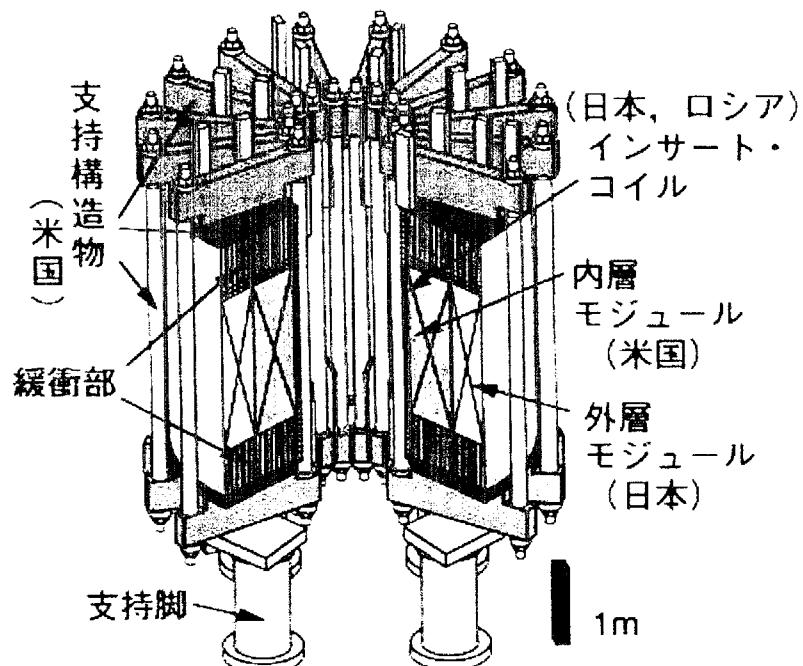


図2 CSモデルコイル

表2 CSモデルコイル定格

通電電流	46kA
発生磁界	13T
インダクタンス	0.6H
蓄積エネルギー	640MJ
励磁速度	+0.4T/s, -1.2T/s

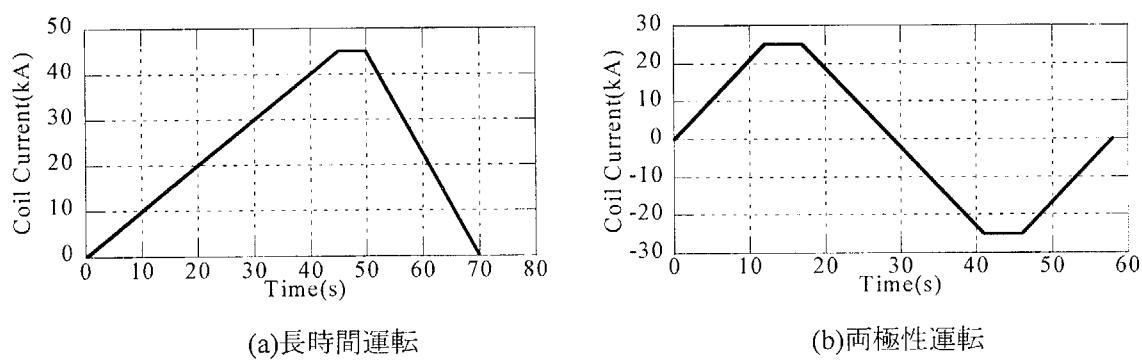


図3 パルス通電パターン

2.1 P-MG の長時間運転

長時間運転に対応する電源は、PSF のみとし、電動発電機、サイリスタ変換器等の機器について熱負荷の検討を行った。CS モデルコイルに 70 秒通電するためには、サイリスタ変換器や発電機の励磁確立、位相検出回路の安定化を考慮する必要があり、電動発電機の励磁時間を約 80 秒と推定した。従って、運転時間としては 80 秒を想定して、各機器の温度上昇を安全側に検討した。

(1) 電動発電機 (P-MG)

電動発電機の励磁巻線の温度上昇は、界磁電流の $I^2t < 4 \times 10^8$ ($A^2 \cdot s$) で制限されている。この制限から 80 秒運転時の電流は、2236A となる。従って、界磁電流を 2236A に制限すると MG の出力電圧は 0.6PU に相当する電圧となる。つまり、MG の出力電圧を 11kV とした。励磁回路の設定電圧選択に、これまでの 2kV、18kV に加えて、新たに 11kV を追加した。また、界磁巻線 I^2t 検出回路と運転時間超過検出回路を設けた。

(2) F 電源サイリスタ変換器 (PSF)

表 3 にサイリスタ変換器の I^2t 換算、 It 換算の制限値と、要求通電波形から導出した対応する値を示す。 I^2t 、 It ともに制限値以下であり問題はない。スナバ回路のセラミック抵抗器の温度上昇についても検討を行ったが、温度上昇値は 113°C である。周囲温度 40°C を加えても高々 153°C である。セラミック抵抗器の最高使用温度は 350°C なので問題ない値であることを確認した。

長時間運転に対応した F 電源の電流定格は、CS モデルコイルの通電電流値である $\pm 46kA$ となる。電圧定格は、発電機の出力電圧が 11kV の場合、 $\pm 1.5kV$ となる。

表 3 F 電源サイリスタ変換器の I^2t 換算、 It 換算値

	I^2t 換算値 ($A^2 \cdot s$)	It 換算値 ($A \cdot s$)
制限値	9.6×10^{10}	1.7×10^6
(制限根拠)	(98kA - 10 s)	(101.2kA - 17 s)
要求通電波形	5.4×10^{10}	1.6×10^6

(3) その他の主回路機器

変圧器、DC リアクトル、断路器、サーボアブソーバ、ケーブル、DC プス、模擬負荷コイルについても、熱的な検討を行った。模擬負荷コイルは、 I^2t 換算値の制限値を越えるため、バイパスさせることにした。なぜなら、CS モデルコイルは十分大きなインダクタンスを有しているため、電流リップル低減用フィルタリアクトルとして使用している模擬負荷コイルは不要だからである。

2.2 計算機システムの対応

P 電源の計算機システムは、運転状態の監視を行う運転系 CAMAC、シーケンス制御を行う放電系 CAMAC、及びコイル電流／電圧をフィードバック制御する実時間制御計算機（DDC）から構成されている。

(1) 運転・放電系計算機システム

運転・放電 CAMAC システムは、CAMAC 規格の 16 ビットマイクロコンピュータ 21 台と入出力モジュールから構成されている。本 CAMAC システムは、主に長時間運転に関するソフトウェアを改造する必要があった。しかし、本システムは製作から約 10 年が経過し、マイクロコンピュータの CPU 性能やプログラム開発環境が最新のものに較べ大きく劣る。すなわち、制御機能の変更及び拡張は困難な状況であった。また、プログラムがすべて ROM 化されているため、改造に必要な ROM も入手できない状況である。このため、本 CAMAC 規格のマイクロコンピュータを 2 台の VME バス規格のマイクロプロセッサとワープロセッショナに置換することとした。また、入出力モジュールは、既設制御盤との取り合いを減らすために既存の CAMAC モジュールを利用した。VME バス規格のシリアルドライバにより VME バスと CAMAC モジュールを接続した[4]。これにより、最小のコストでソフトウェアの改造を行った。図 4 に改造後の運転・放電系計算機システム構成図を示す。

(2) 実時間制御計算機（DDC）

JT-60 実験での F 電源の運転では、プラズマ着火前は P コイル励磁指令の制御タイミングにより放電条件で設定された電流値まで正弦波状に電流を制御する。IP 励起シーケンス開始指令によるプラズマ着火後は、全系制御設備の実時間フィードバック計算機からの指令によりコイル電流／電圧を制御する。この運転パターンでは、CS モデルコイルのパルス通電で要求されている直線的な電流立上げを行うには、初期励磁電流値を 0A として運転することになる。しかし、SMES コイルに対してパルス通電を行った結果、図 5(1)に示すように、循環電流制御の誤差、電流値の AD 変換器の誤差により、初期励磁電流を完全に 0A にすることはできず、結果として段階的な電流立上げとなってしまった。そのため、CS モデルコイルのパルス通電では、図 5(2)のように初期励磁期間中はサイリスタ変換器を運転せず（サイリスタにゲートパルスを与えない）、Ip 励起シーケンス開始のタイミングにてサイリスタ変換器を運転し、電流を立上げるように改造した。

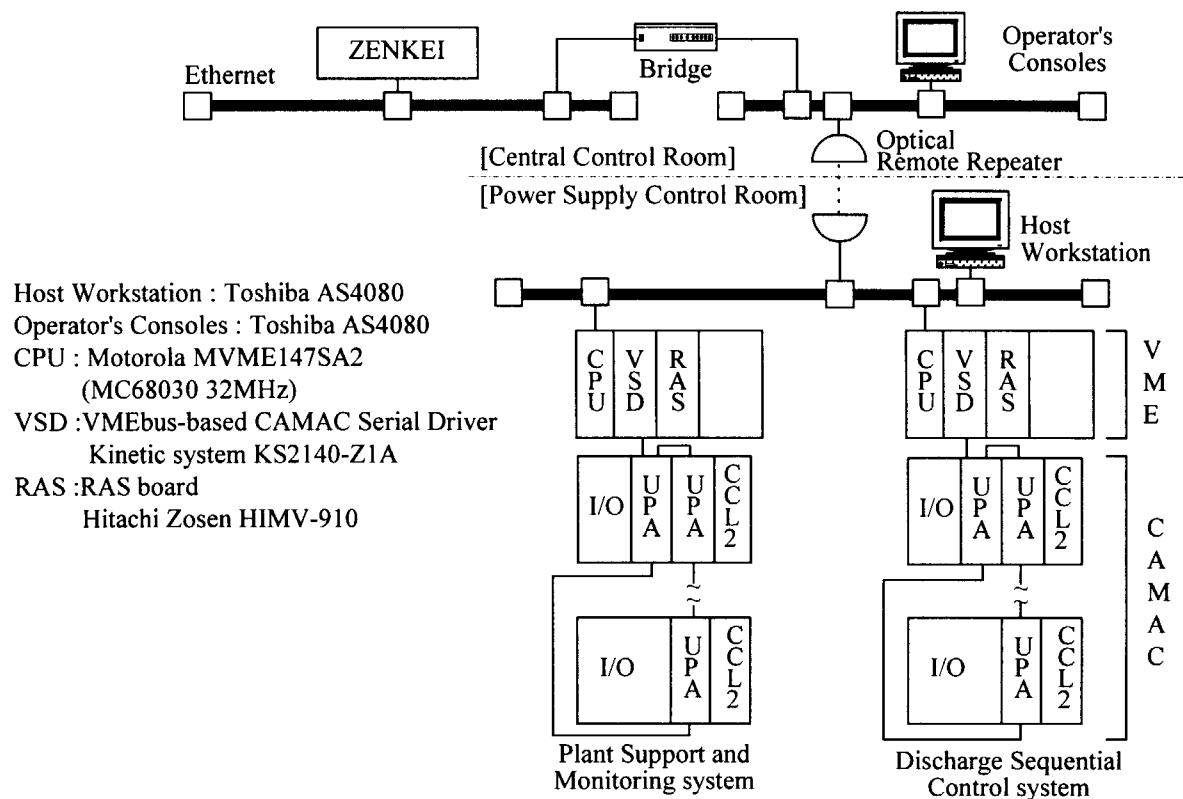


図4 運転・放電系計算機システム構成図

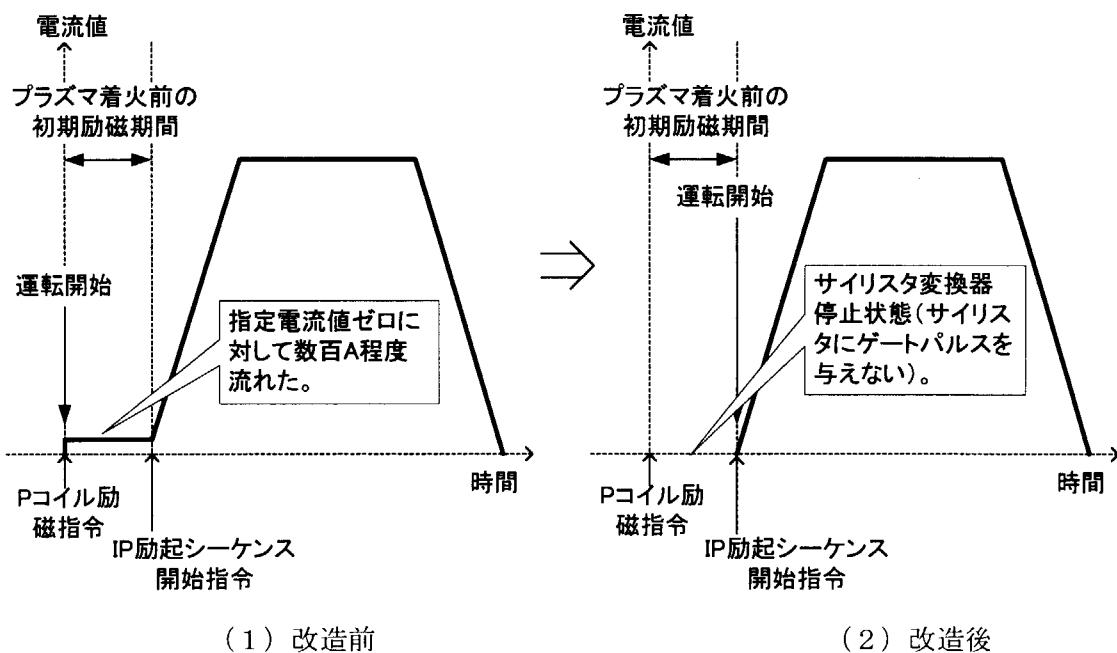


図5 F電源の運転方法

2.3 接地抵抗器

P電源の直流回路は、回路の浮遊容量による異常電圧の発生防止、ポロイダル磁場コイル及びサイリスタ変換器の安全かつ経済的な絶縁設計ができるなどの理由により、直流回路の片端子を抵抗接地している。この接地抵抗器の抵抗値は、一般的には耐圧の観点から可能な限り低抵抗接地が望ましく、一方地絡電流抑制の観点からは、可能な限り高抵抗接地が望ましい。したがって、各コイル電源の抵抗値と地絡電流の関係や地絡電流とコイル許容応力の関係から抵抗値を決定してある。具体的にはF、V電源の接地抵抗値は、それぞれ 0.056Ω 、 0.3Ω である。

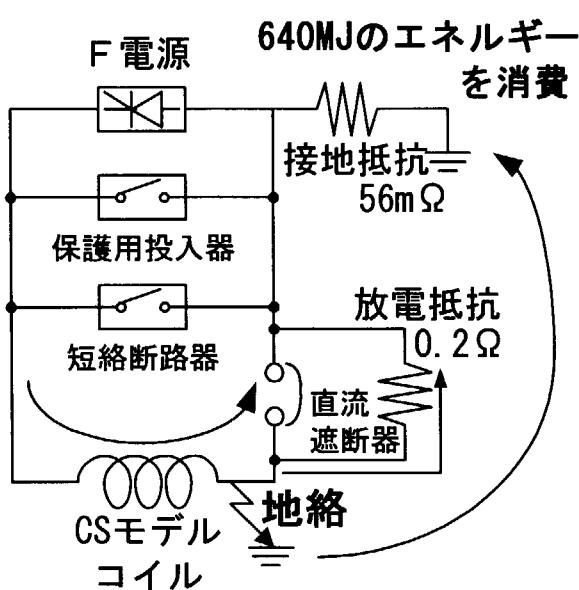


図6 改善前のF電源における地絡発生時の回路

CS モデルコイルのパルス通電中に地絡が発生した場合について検討を行った。F電源の接地抵抗は 0.056Ω であり、放電抵抗の 0.2Ω に対して無視できない。地絡が発生すると、図6に示すように地絡電流は 0.2Ω の放電抵抗と 0.056Ω の接地抵抗器に分流され、抵抗の小さい接地抵抗器に地絡電流のほとんどが流れることになる。CS モデルコイルには、最大 640MJ のエネルギーが蓄えられているので、この蓄積エネルギーのほとんどが接地抵抗器で消費されることになる。同様に、V電源の接地抵抗についても容量が不十分なことが判明した。このため、CS モデルコイル通電用に新たに接地抵抗器を設置した。抵抗値は、1) 接地抵抗器の容量をなるべく小さくするよう考慮する、2) P電源の直流回路の対地電圧

を低くおさえる、などの点について検討を行い 10Ω - 15MJ とした。

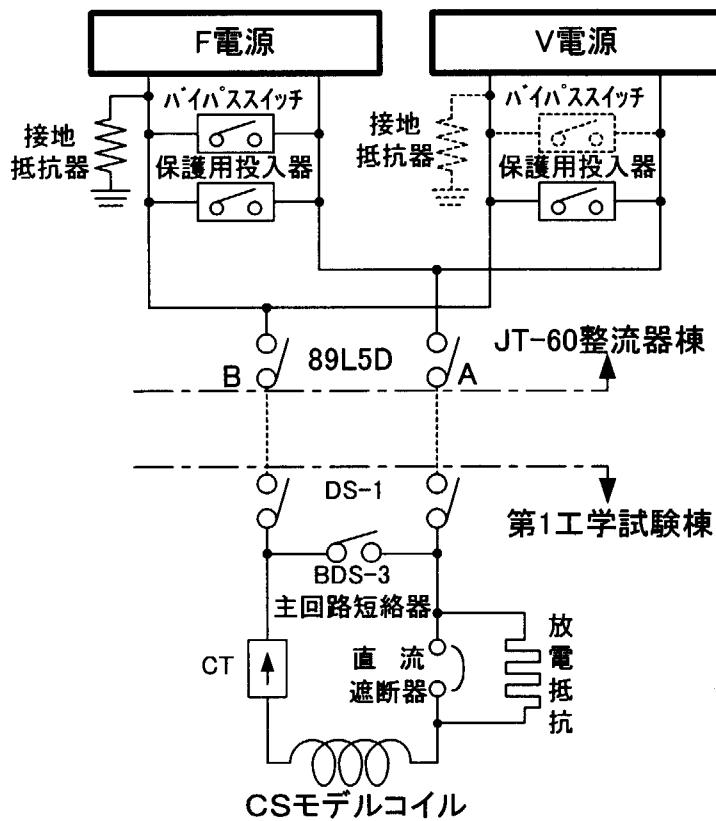
また、F電源のサイリスタ変換器の一部は、耐電圧値が AC 4.3kV -1 分である。F電源のパルス通電試験時には放電抵抗を 0.1Ω とし、サイリスタ変換器の耐電圧値を超えないように直流遮断時の電圧を 5kV に制限した。これにより、サイリスタ変換器の耐電圧ピーク値 6.1kV を超えないようにした。

この接地抵抗器はF、V電源で共通に使用できるようにケーブルで接続変更できるように工夫した。また、地絡過電流検出器を設置して保護を行うよう措置した。地絡過電流設定値は、1 A- 100ms とし、コイル通電中の地絡電流を監視しながら運転を行った。

2.4 バイパススイッチ

(1) 保護システムの考え方

CS モデルコイルへのパルス通電試験回路を図 7 に示す。F 電源及び V 電源の保護用投入器は JT-60 コイルを負荷とする場合、システム保護の最後の手段である。このため、F、V 電源の保護用投入器の通電容量は、JT-60 の F、V コイルの時定数から定められており、それぞれ 92kA-5 秒、60kA-5 秒である。しかし、CS モデルコイルへのパルス通電試験時における回路の異常時には、まず保護用投入器が動作し、450ms 後に直流遮断器が開放し、550ms 後に主回路短絡器（BDS-3）が開放される。直流遮断器の開放によってコイル電流は放電抵抗に転流し、放電抵抗でコイルのエネルギーを消費させ消磁する。つまり、CS モデルコイルを負荷とする場合には、システム保護は直流遮断器と放電抵抗となり、保護用投入器動作はもはや P 電源の最終の保護手段ではなくなる。従って、主回路短絡器及び直流遮断器の動作が正常に行われなかった場合には、保護用投入器動作だけでは通電容量を越えてしまい、電源自体を保護することはできない。このため、保護用投入器の通電容量を越えないように、保護用投入器と並列にバイパススイッチを接続することとした。



V 電源を使用したパルス通電試験の場合、接地抵抗器及びバイパススイッチは切換えて使用する。

図 7 CS モデルコイルへのパルス通電試験回路

(2) 真空バイパススイッチ

保護用投入器と並列に接続するバイパススイッチとしては、磁場閉じ込め方式の核融合装置や超電導電力貯蔵コイル（SMES）などのコイル保護用直流遮断器に使用できるように開発した真

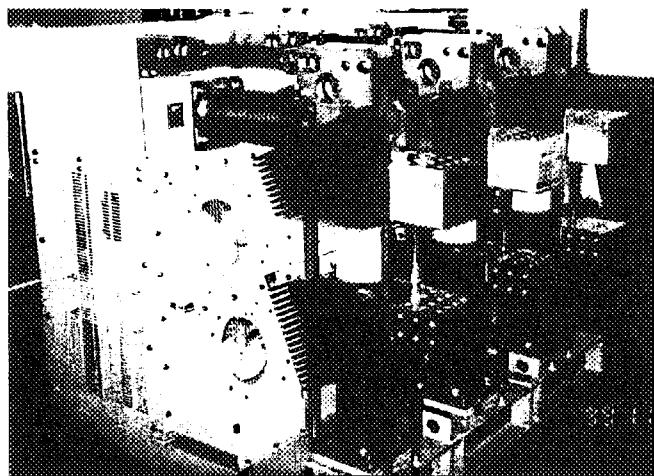


図8 真空バイパススイッチ

空バイパススイッチを選定した[5]。この真空バイパススイッチは、単極当たりの連続通電容量 12kA で、3極で 36kA の電流を流すことができる。図8に真空バイパススイッチの写真示す。表4にその定格を示す。

表4 真空バイパススイッチの定格

冷却方式	電流	電圧
強制冷却	12kA	12kV

3. 試験結果

3.1 CS モデルコイルの高周波特性測定[6]

(1) 高周波測定方法

大型コイルではコイル内部の静電容量とインダクタンスが共振する可能性がある。このため、コイル通電に先立って、コイルの高周波特性を取得した。測定方法は、電圧源によりコイル端子間にステップ電圧あるいは正弦波電圧を印加して、CS モデルコイル内部の分担電圧及び電流を測定した。測定回路を図 9 に示す。測定周波数は、0.1Hz から 3.5kHz まで実施した。

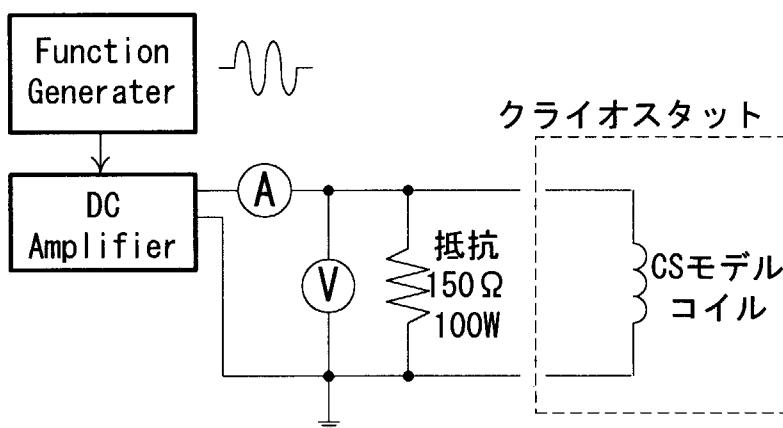


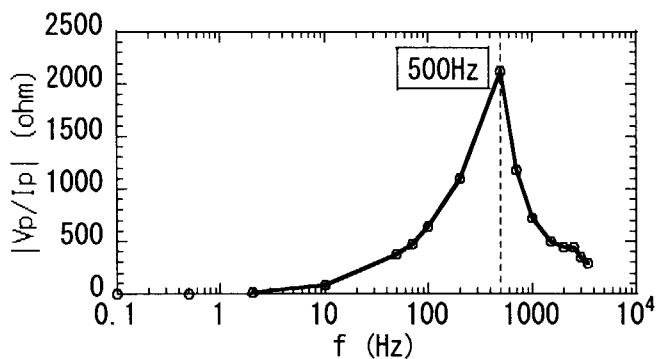
図 9 高周波特性測定回路

(2) 測定結果

図 10 に測定した周波数特性を示す。インピーダンスは、500Hz 付近で最大となり、位相は遅れ位相から進み位相に変化している。500Hz 付近でインダクタンスとコイル内部のキャパシタンスによる何がしかの並列共振が起こっていると推察される。

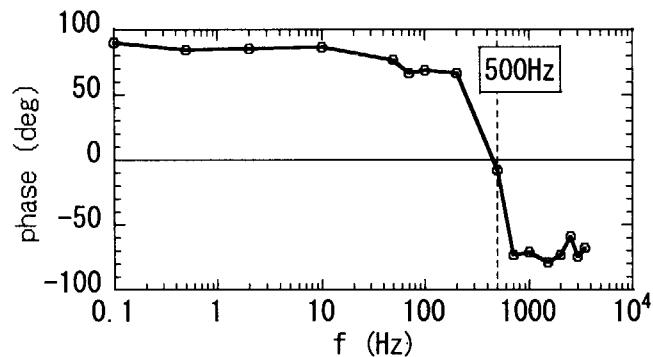
各周波数で測定した各単位コイルの分担電圧から、過電圧発生の有無を調べた。図 11(1)～(4)に各周波数におけるコイルの分圧比の分布を示す。ここで分圧比は、測定した各単位コイルの分担電圧を印加電圧で割った値である。CS モデルコイルは、36 個のコイルがあるので、均等に分担されている場合の分圧比は 0.028 程度になる。0.1Hz、500Hz において、分担電圧のばらつきはほぼ均等になっているが、3.5kHz では、コイルによりばらつきが大きい。高い周波数ほど、分担電圧のばらつきが大きくなることがわかる。

パルス通電試験では、サイリスタ変換器の高周波の電圧リップルを考慮する必要があるので、分担電圧のばらつきが生じる可能性がある。そこで、サイリスタ変換器の電圧リップルの測定を行った。図 12 に F 及び V 電源の電圧リップル測定結果を示す。電圧リップルの振幅は約 50V から 75V 程度であり、周波数は 1.8kHz から 2.0kHz であった。電圧リップルの周波数付近での分担電圧のばらつきは、約 3 から 4 倍程度である。したがって、コイルを破損するほどの過電圧は発生しないと結論づけられた。



(1) インピーダンス

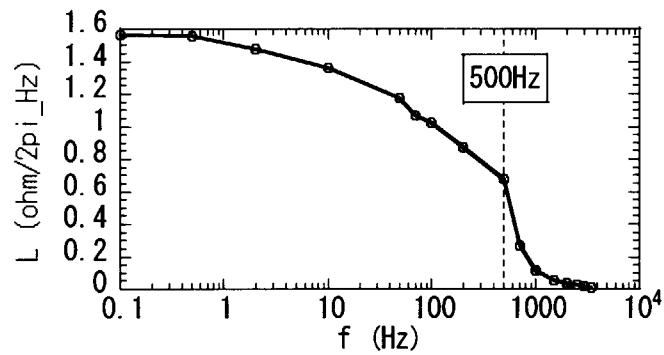
500Hz 付近でインピーダンスが最大となっている。



(2) 位相

500Hz 付近で位相は遅れから進みになっている。

ゲインと位相の関係から 500Hz 付近で並列共振している。



(3) インダクタンス換算値

インダクタンス換算値は、
500Hz 以下では大きく
500Hz 以上では小さい。
500Hz 以上の領域では、コイル内
部のキャパシタを電流が流れ、相
対的にインダクタンスが小さくな
っている。

図 10 CS モデルコイルの高周波特性結果

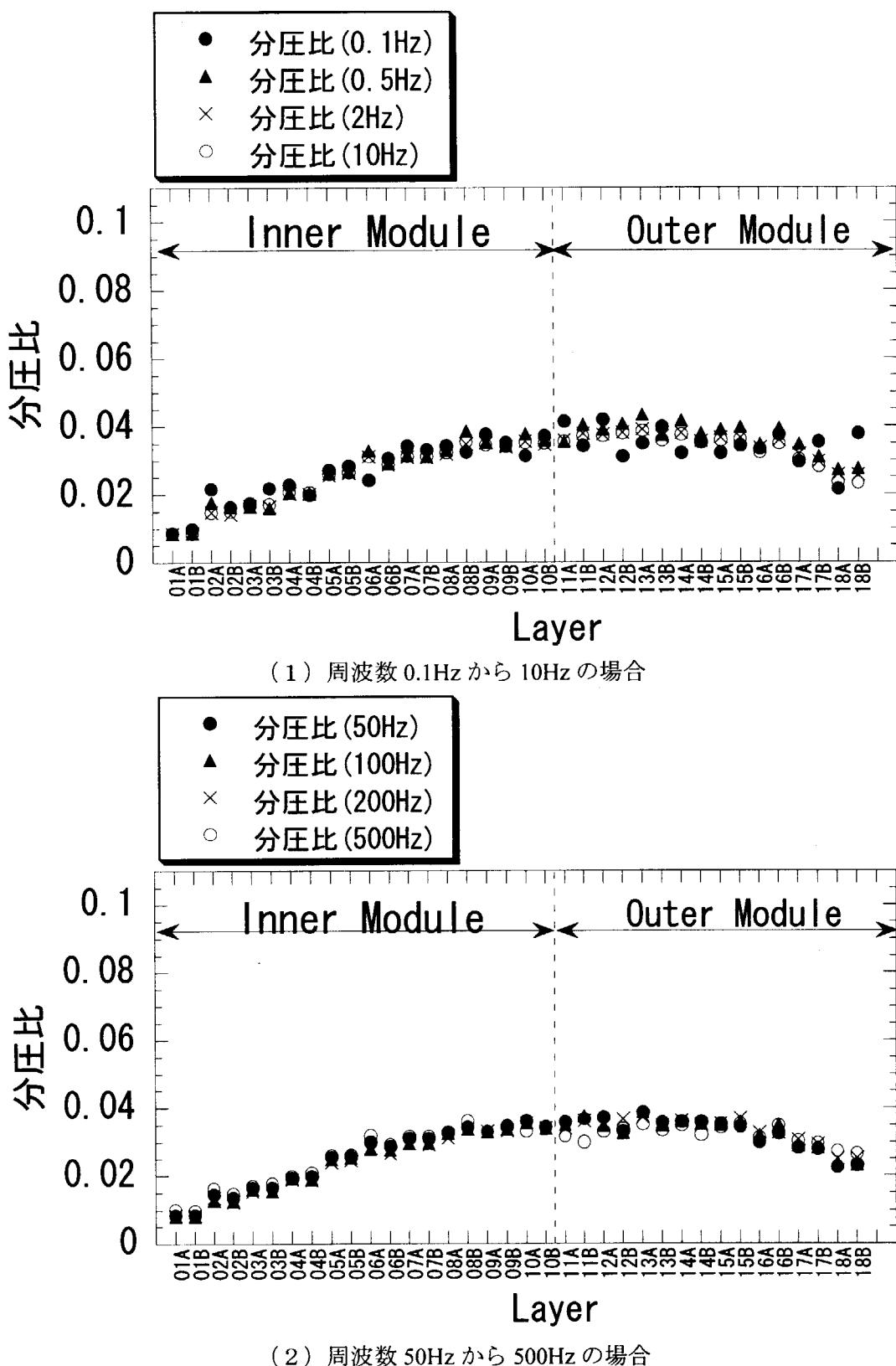


図 1.1 各周波数における分担電圧

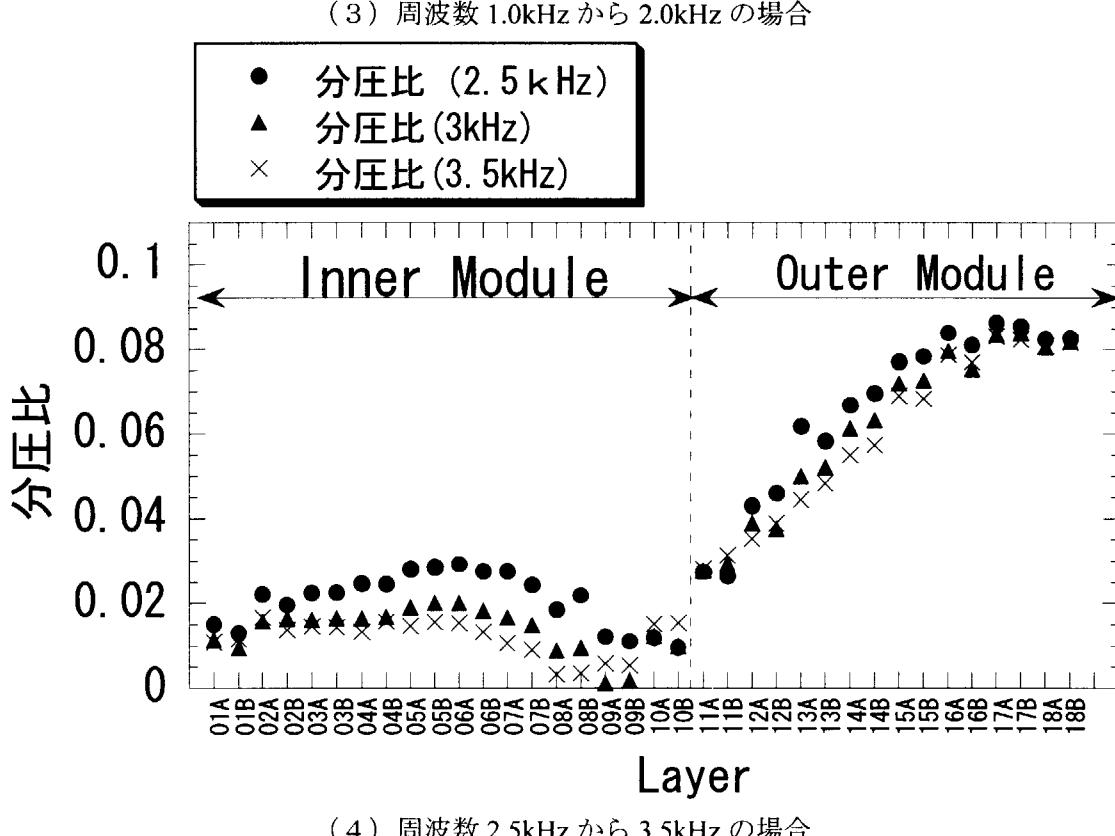
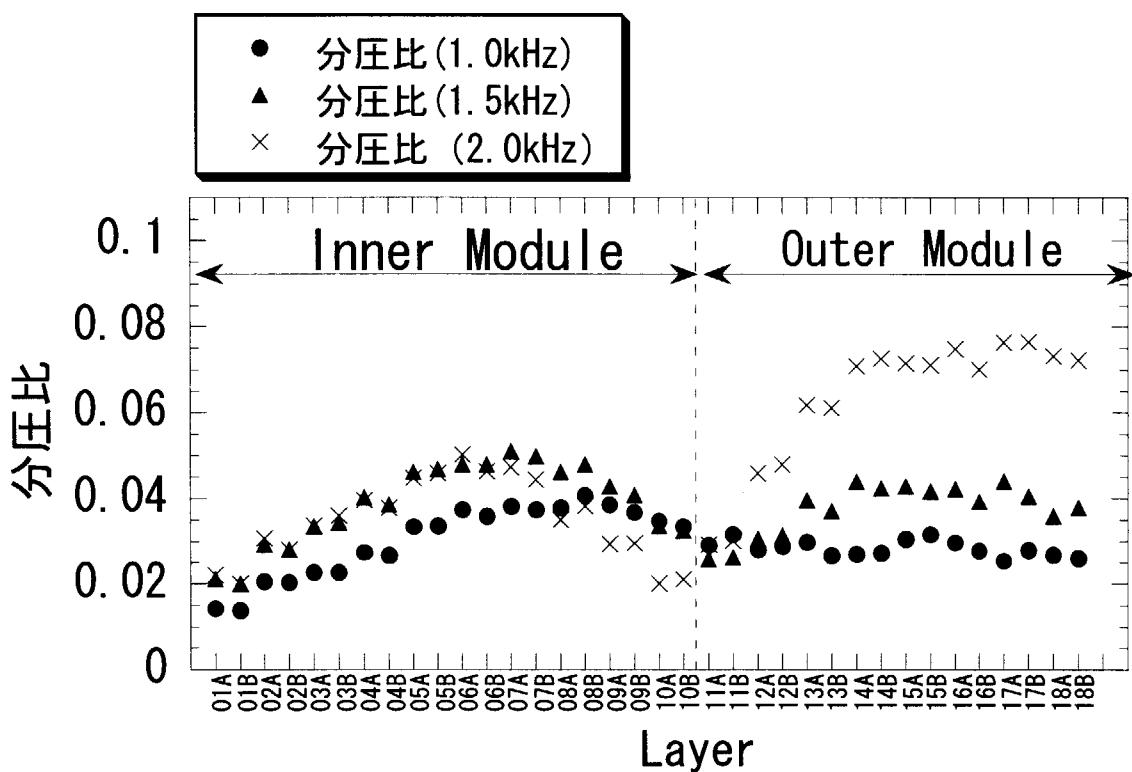
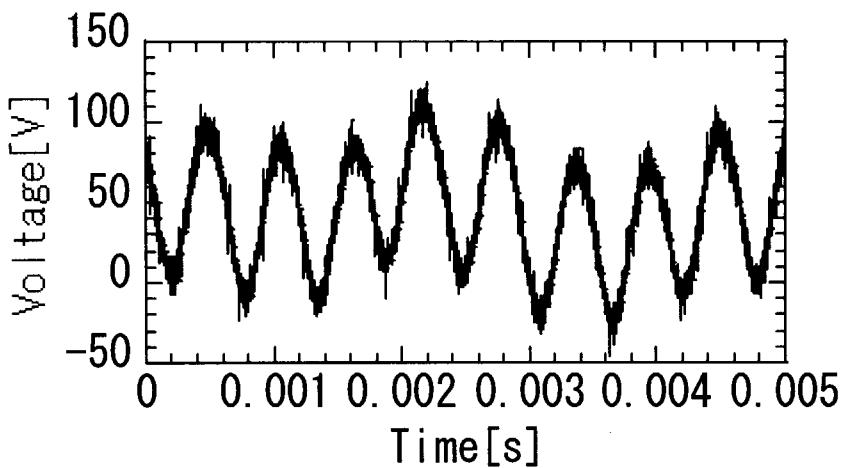
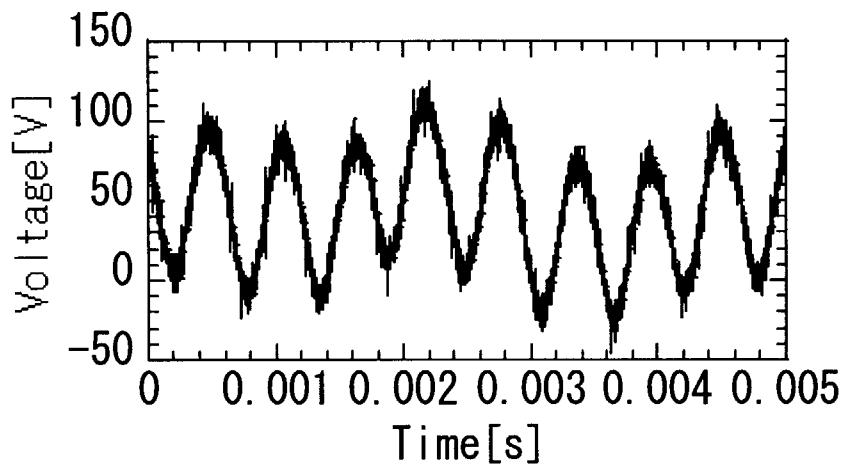


図 1 1 各周波数における分担電圧



(1) F 電源



(2) V 電源

図 1 2 サイリスタ電源の電圧リップル

3.2 電流制御特性の予備検討

高周波特性測定の結果からコイルの伝達関数を同定し、等価回路を求めた。この等価回路を用いて、パルス通電のシミュレーションを行い、電流制御特性の事前検討を行った。

(1) 伝達関数の同定

ゲイン及び位相差より、2次遅れ系でかつ進み位相であることから、伝達関数 $G(s)$ は式 (1) になると仮定できる。

$$G(s) = \frac{a_1 + a_2 s}{b_1 + b_2 s + b_3 s^2} \quad (1)$$

ここで、ゲインと位相差は式(2)、(3)で表される。

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\{\text{Re}[G(j\omega)]\}^2 + \{\text{Im}[G(j\omega)]\}^2} \quad (2)$$

$$\angle G(j\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Im}[G(j\omega)]}{\text{Re}[G(j\omega)]} \quad (3)$$

ここで、

$$\text{Re}[G(j\omega)] = \frac{a_1(b_1 - \omega^2 b_3) + \omega^2 a_2 b_2}{(b_1 - \omega^2 b_3)^2 + \omega^2 b_2^2}$$

$$\text{Im}[G(j\omega)] = \frac{\omega a_2(b_1 - \omega^2 b_3) + \omega a_1 b_2}{(b_1 - \omega^2 b_3)^2 + \omega^2 b_2^2}$$

である。式(2)、(3)から、

$$\frac{|G(j\omega)|}{\sqrt{1 + \tan^2 \angle G(j\omega)}} = \left| \frac{a_1(b_1 - \omega^2 b_3) + \omega^2 a_2 b_2}{(b_1 - \omega^2 b_3)^2 + \omega^2 b_2^2} \right| \quad (4)$$

が求まる。式(4)を用いて、伝達関数のパラメータを、ゲインと位相データから最小二乗法により決定した。算出したCSモデルコイルの伝達関数は式(5)の通りである。

$$G(s) = \frac{2.4702 + 469.48s}{700.40 + 0.20s + 0.0001s^2} \quad (5)$$

(2) 等価回路の導出とシミュレーション

式(5)の伝達関数は入力が電圧、出力が電流とする駆動点アドミタンスを考えることができる。この伝達関数とCSモデルコイルのインダクタンス0.6Hを考慮すると、図13に示す等価回路となる。

この等価回路を用いて、P電源を模擬したパルス通電のシミュレーションを行った。シミュレ

ーションの目的は、制御不安定を発生せずに、安定に制御できるような、電流フィードバックゲインの設定である。過渡安定性の目標は、電流の応答速度が0.1秒から1秒程度を得ることである。その結果を図14に示す。応答速度が0.1秒の場合、電流は良く追従しているが、電圧が振動している。応答速度が1秒の場合、電圧変動も少なく良好に制御されている。実際のパルス通電試験では、応答速度が1秒となるようなフィードバックゲインを選択することにした。

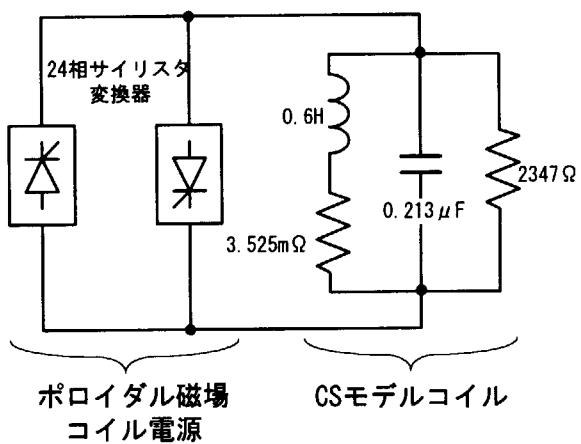
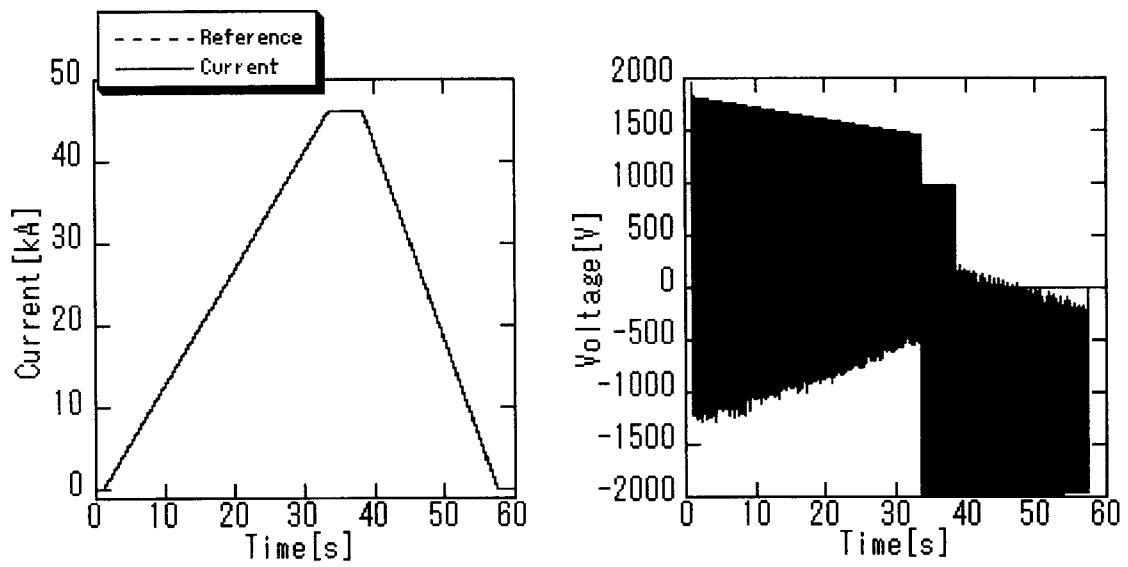
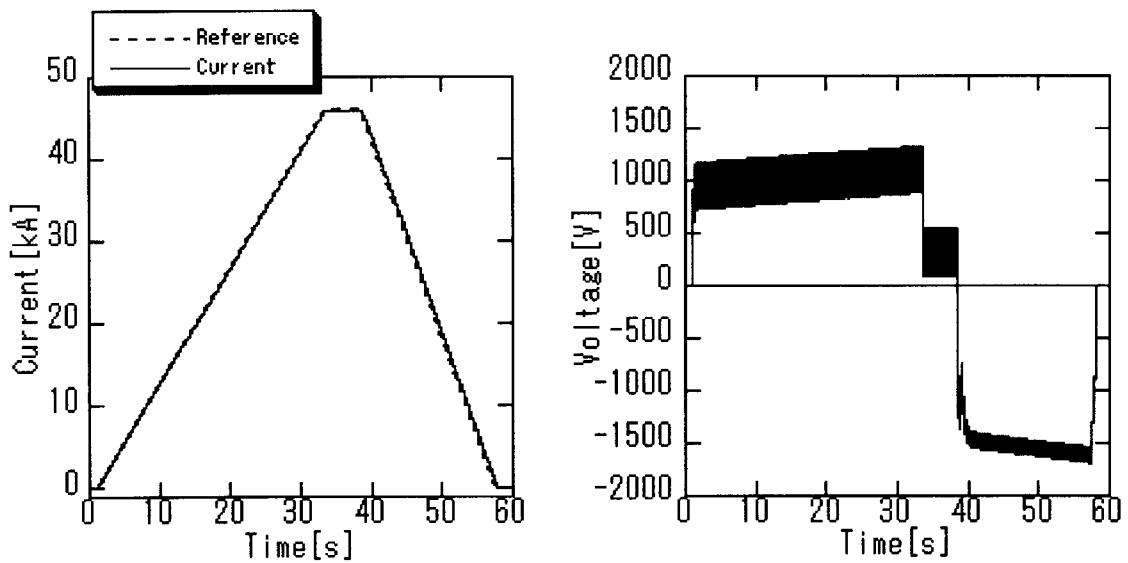


図13 CSモデルコイル通電の等価回路



(1) 応答速度 0.1 秒の場合



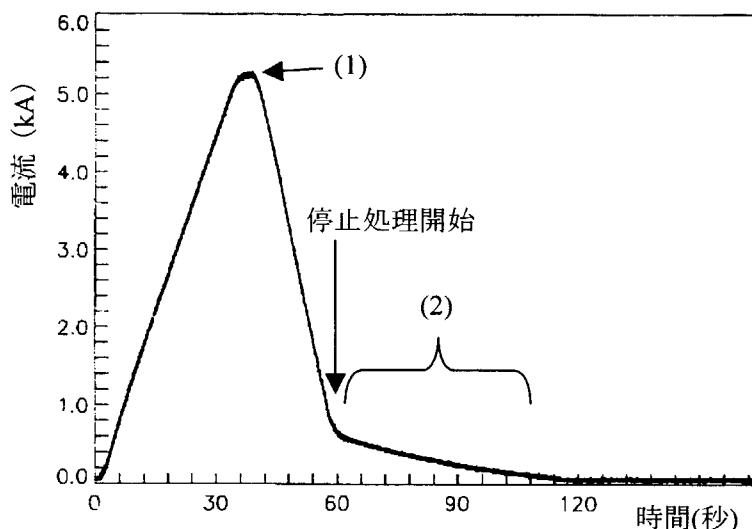
(2) 応答速度 1 秒の場合

図 14 シミュレーション結果

3.3 5月の通電試験

平成12年5月23日から26日までF電源を使用して34ショットの通電試験を実施し、5月23日の最終ショットにて、CSモデルコイルの定格通電に成功した。また、-1.5T/sでの減磁に成功した。

最初は、応答速度が1秒となるような制御ゲインで通電を行った。また、地絡電流や各機器の温度監視を行いながら試験を実施した。最初の通電では、制御ゲイン不足気味でフラットトップへの整定に約2秒を要した。また、電流立下げ時には、制御ゲイン不足、実時間制御計算機のA/D変換器の誤差、分解能及び循環電流制御偏差などの理由により、電流が高いところで停止処理が行われた結果、コイル電流を完全にゼロに制御する前に制御が打ち切られた。そのときの通電波形を図15に示す。この対策として、(1) 制御ゲインを2倍としてフラットトップへの整定時間を改善する。(2) 電流立下げ時の電流指令値を-500Aで1秒間通電する、の2項目を実施した。この対策により制御ゲイン不足、電流立下げ時の問題に対処できた。また、電流立下げ時の処理については5月の段階では仮対策とし、7月の通電試験前に恒久対策を施すこととした。



(1) 制御ゲイン不足でフラットトップへの整定に約2秒を要した。制御ゲインを2倍にして対処した。(2) 制御ゲイン不足、実時間制御計算機のA/D変換器の誤差など理由により、電流が高いところで停止処理が行われ、コイル電流を完全にゼロに制御する前に制御が打ち切られた。電流指令値を-500Aで1秒通電するようにして対処した。

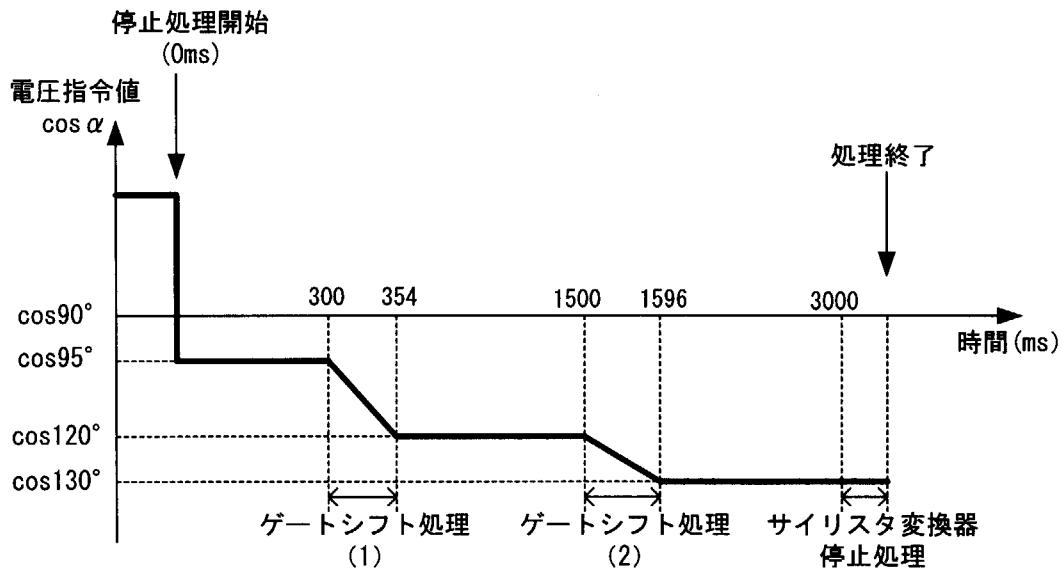
図15 F電源パルス通電波形

地絡電流に関しては通電中でも電流が流れていないことを確認した。CSモデルコイルへの通電用断路器（89FP5）及びサーボアブソーバ（SA-F）にはサーモレベルを貼り付けて温度監視を行ったが、異常な温度上昇は無かった。また、F電源サイリスタ変換器の出力平角ブスの温度上昇を赤外線映像装置により監視した。定格通電時の温度上昇が約3°Cから4°Cであり、全く問題ないことを確認した。

なお、超電導磁石研究室にて行った通電用ケーブル周辺の漏洩磁場測定は、ケーブルピット中心から4mのところで、46kA通電時に6.2ガウスであった。

3.4 電流立下げ制御の改善

5月の仮対策時には、電流プレプロにて負電流を一定時間設定することで、サイリスタ変換器に負電圧を印加して電流をゼロにした。恒久対策では、停止処理でサイリスタ変換器に負電圧を一定時間印加し、コイル電流が完全にゼロになったところでコイル電流制御を終了する様に変更した。具体的には、実時間制御計算機からの電圧指令値 ($\cos \alpha$) を図16に示すように変化させるようプログラムを変更した。対策後、7月10日に模擬負荷による通電試験を実施し、異常がないことを確認した。



停止処理が開始されると、電圧指令値を $\cos 95^\circ$ にして 300ms 間運転し、その後、電圧指令値を $\cos 130^\circ$ まで、ゆるやかに変化させてコイル電流を減少させる。停止処理から 3000ms 間運転し、その後サイリスタ変換器を停止させる。負電圧をゆるやかな変化で、3000ms 間印加することでコイル電流を完全にゼロにすることができる。

図16 停止処理の改善

3.5 7月の通電試験

5月の試験結果時に用いた制御ゲインを2倍にして応答速度の向上を図った。また、前述のような電流立下げ処理の恒久対策を行って実施した。7月11日から13日まではF電源での通電を行い、14日にV電源への切換え作業を実施した。7月14日から20日まではV電源での通電を行い、20日にF電源への切換えを行った。7月21日は再度F電源での通電を実施した。全部で61ショットの通電試験を実施した。図17にF電源を使用したパルス通電の電流波形について示す。制御ゲインの最適化により制御応答速度は約0.4秒に改善された。また、停止処理の改善によりコイル電流が完全にゼロになっている。図18にはコイル電流と電動発電機の回転数の関係について示す。このグラフでは、CSモデルコイルと電動発電機間でのエネルギーの授受が行われていることを示している。充電時にはCSモデルコイルに磁気エネルギーが450MJ蓄積された。放電時にはCSモデルコイルに蓄積された磁気エネルギーがサイリスタ変換器を介して発電機を加速した。加速により蓄えられたエネルギーは、390MJとなり、効率は約87%になる。付録にパルス通電試験時のデータを示す。

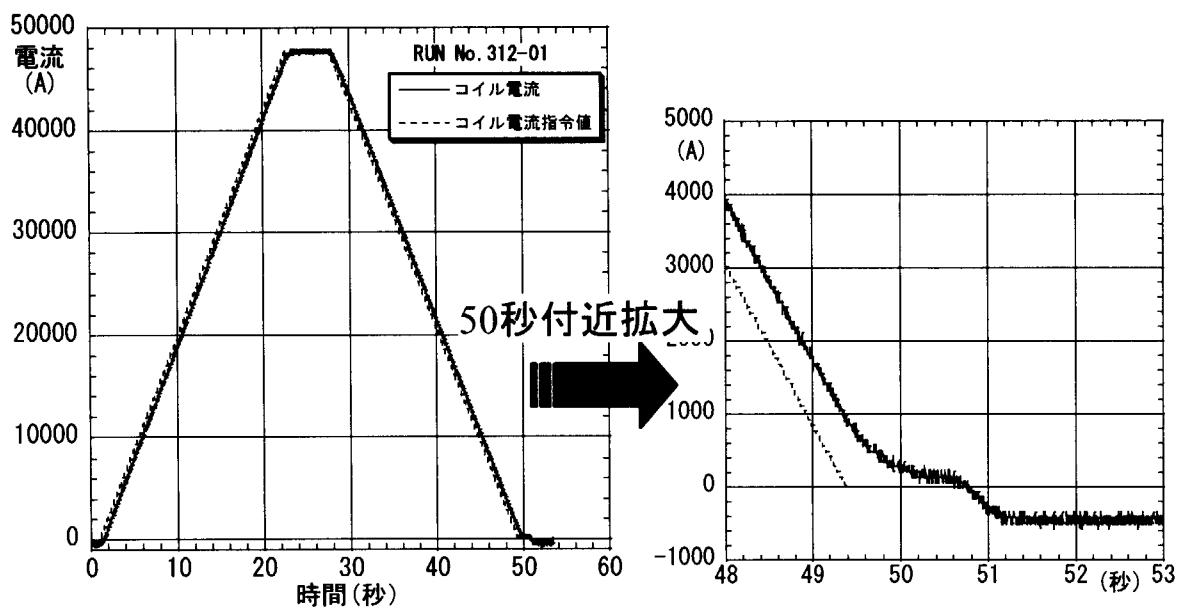
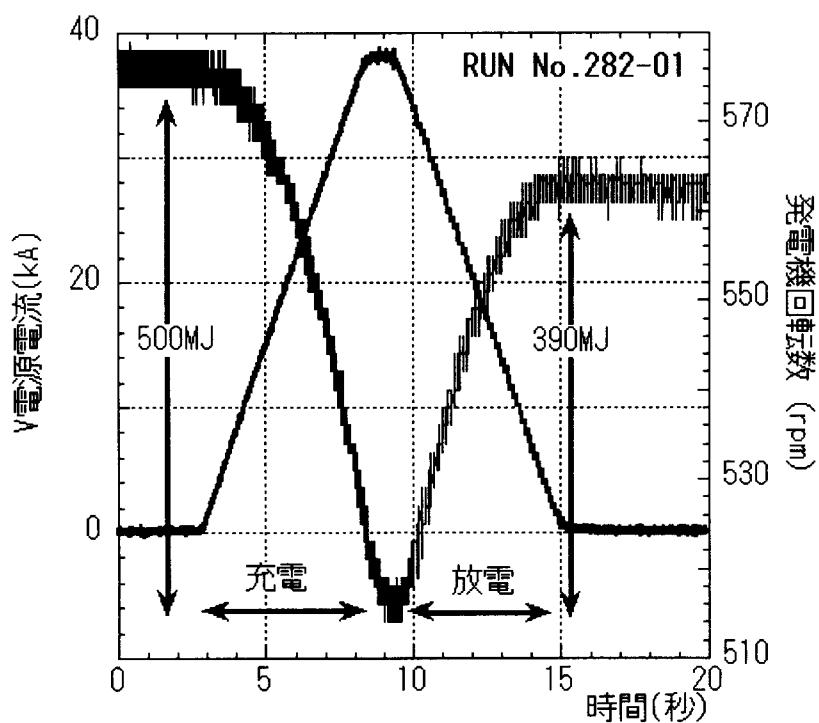


図 17 F 電源を使用した CS モデルコイルのパルス通電波形



充電時には CS モデルコイルに磁気エネルギーが 450MJ 蓄積された。放電時には CS モデルコイルに蓄積された磁気エネルギーがサイリスタ変換器を介して発電機を加速した。加速により蓄えられたエネルギーは 390MJ であり、効率は約 87% になる。

図 18 蓄積エネルギーの回収 (V 電源通電)

4. まとめ

P電源では、1992年からCSモデルコイルのパルス通電試験に備え、設備の改造、検討及び安全対策を行った。長時間運転の改造では、発電機励磁巻線の許容温度上昇を超えないような励磁電流で運転するために、発電機出力電圧の選択回路に11kVを追加した。また、界磁巻線 I^2t 検出回路及び運転時間超過検出回路を設けた。通電容量を越える機器の安全対策は、パルス通電試験用の接地抵抗器、バイパススイッチの設置を行った。パルス通電試験に先立ち、CSモデルコイルの高周波特性試験を実施し、その結果から安定に制御できる電流フィードバックゲインを設定した。また、サイリスタ電源の電圧リップルとコイル分担電圧のばらつきにより発生する電圧は、コイルを破損するほどの電圧は発生しないことを確認した。2000年5月及び7月にはパルス通電試験を行い、計画どおりの試験を無事に終了することができた。

今後の課題としては、超伝導コイルの電流制御を行う場合の精度についての問題を検討する必要があると考えられる。つまりコイル電流制御を計算機で行う場合には、A/D変換器を使用するが、この変換係数と誤差によって制御精度が決定されてしまう。F電源の場合には、1デジットは70Aにもなる。また、A/D変換器自体の誤差も数デジットあるので、結局数百Aの誤差を生じてしまう。今回のパルス通電試験で経験したように、数百Aでも流れていると、コイル時定数が極めて大きいため、残留電流が長時間流れ続けることになる。したがって、コイル電流制御の精度向上が必要である。

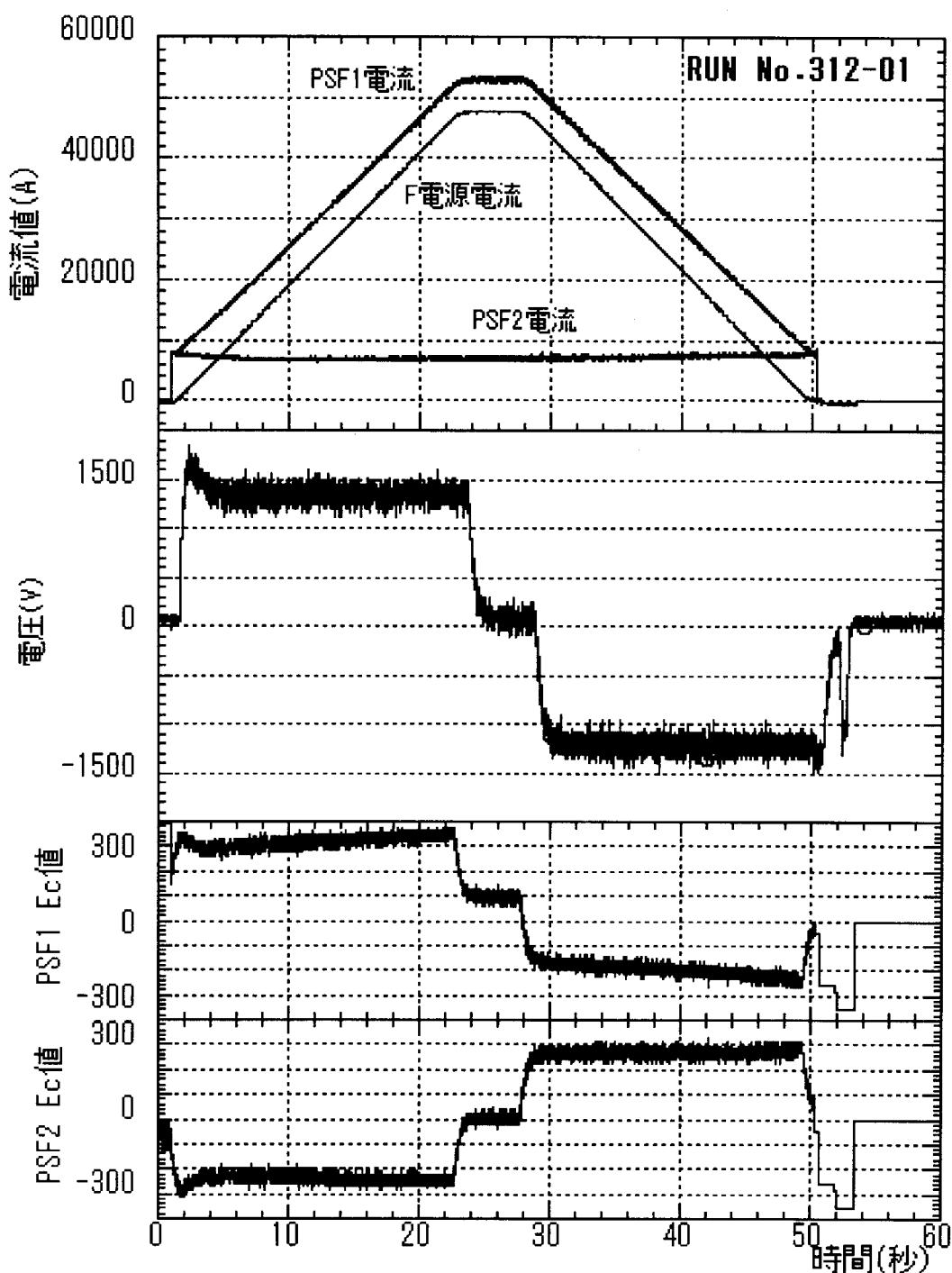
謝 辞

本パルス通電試験を行うために実施した JT-60 ポロイダル磁場コイル電源の改造作業に関して、多大な支援及びご指導をして頂いた前 JT-60 第1試験室長で現企画室 木村豊秋氏に深く感謝致します。

参考文献

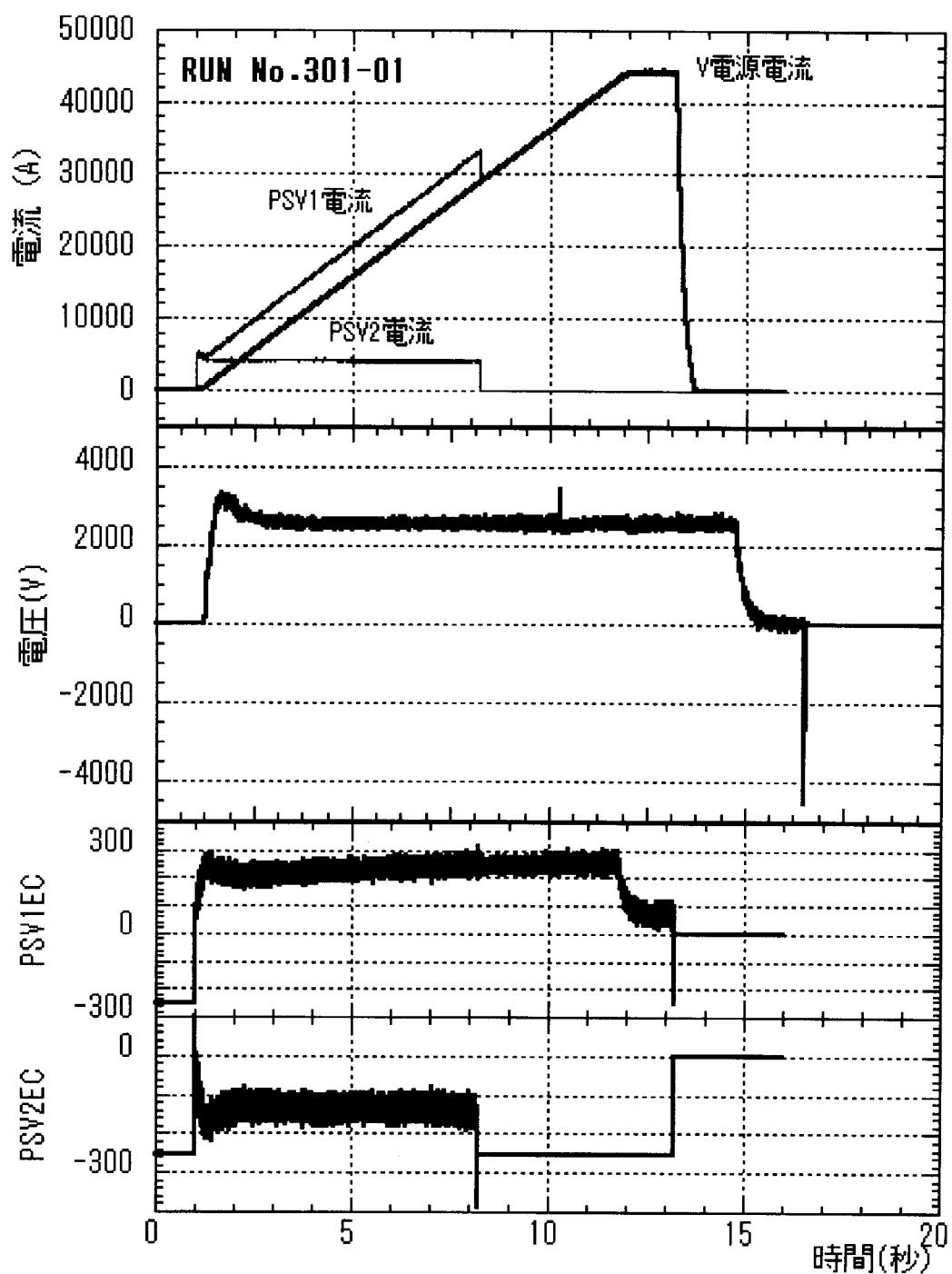
- [1] プラズマ・核融合学会誌, 第 73 卷増刊, 3, (1997).
- [2] 電気学会(編) :「電気工学ハンドブック」(1988).
- [3] 小木曾勝也, 辻博史:「世界初の強制冷却型電力貯蔵用超電導コイルの実験に成功」, 電学誌, 116 卷 12 号, 835, (1996).
- [4] 戸塚俊之:JAERI-M 93-158, “VME-bus と CAMAC システムを用いた JT-60 制御用データ伝送システムの開発” (1993).
- [5] M. Matsukawa, Y.M. Miura, T. Terakado, T. Kimura et al., “DEVELOPMENT OF A VACUUM SWITCH CARRYING A CONTINUOUS CURRENT OF 36KA DC”, 19thISDEIV, p415-418, 2000.
- [6] 島田勝弘, 三浦友史, 寺門恒久, 松川誠, 磯野高明, 安藤俊就, 布谷嘉彦:「大型超伝導コイルの高周波インピーダンス特性とコイル通電に対するその影響」, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会講演予稿集, 141, (2000).

付録 A. CS モデルコイルのパルス通電試験データ



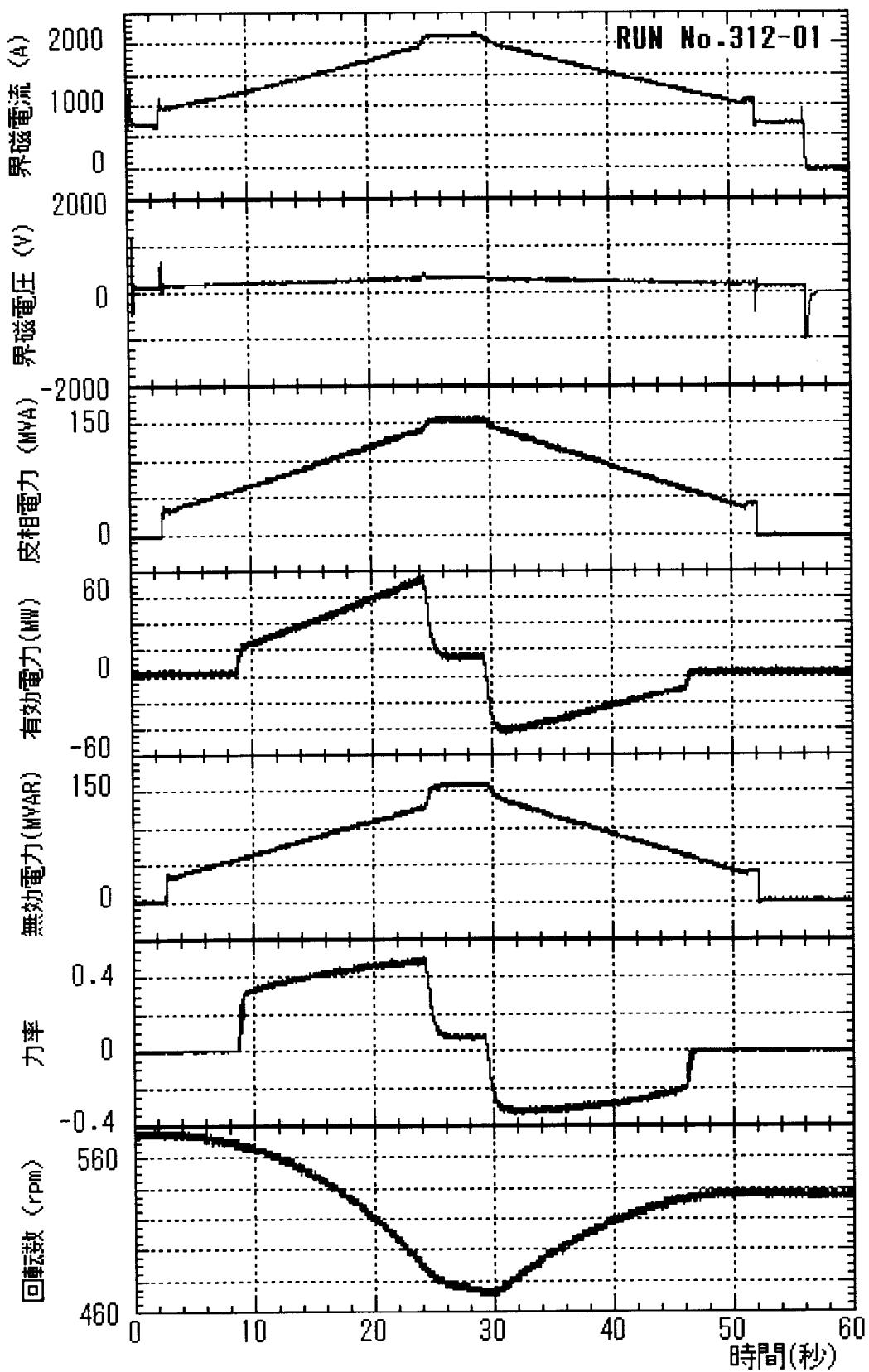
コイル電流 46kA 立上げ、立下げ時間 21.7 秒、フラットトップ 5 秒の通電波形

図 A 1 F 電源通電データ



手動遮断によるコイル電流 44.3kA 立上げ時間 10.8 秒の通電

図 A 2 V 電源通電データ



コイル電流 46kA 立上げ、立下げ時間 21.7 秒、フラットトップ時間 5 秒通電時の電動発電機データ

図 A 3 F 電源通電時の電動発電機データ

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光照度	ルーメン	lm	cd·sr
放熱能	ルクス	lx	lm/m ²
吸収線量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
線量当量	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.1855 J(15 °C)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1868 J(国際蒸気表)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		仕事率 1 PS(仏馬力)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		= 75 kgf·m/s	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 735.499 W	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			
1.60218 × 10 ⁻¹⁴	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1	0.01	100		1	3876	1	100	1	
3.7 × 10 ¹⁰	1					2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01		

(86年12月26日現在)

一〇六〇電源を用いた一トモ中心ソノハイドモードル「ヨイル」のパルス通電試験