

JAERI-Tech

97-044



JT-60イオンサイクロトロン高周波加熱装置用
健全性診断システムの開発

1997年9月

横倉賢治・森山伸一・寺門正之

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。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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。

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 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

J T - 6 0 イオンサイクロトロン高周波加熱装置用
健全性診断システムの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部
横倉 賢治・森山 伸一・寺門 正之

(1997年8月15日受理)

J T - 6 0 高周波加熱装置では、運転開始以来11年が経過し、経年劣化が原因で発生した異常の発生頻度が年々増加してきた。そのような状況下で効率の良い高周波加熱実験を支障なく進めるには、同高周波加熱装置の健全性を定常的に確保し、異常の発生では、速やかに不具合部の同定および原因究明が必要となる。これらの問題を解決するために、より迅速にかつ効率良く少人数で異常原因調査、復旧および再調整を可能とした健全性診断システムの考案、開発を実施した。更に同診断システムが装置全体の健全性維持に有効であることを実証した。

Development of Diagnostic System for JT-60 ICRF Heating System

Kenji YOKOKURA, Shinichi MORIYAMA and Masayuki TERAKADO

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

(Received August 15, 1997)

The ion cyclotron range of frequencies (ICRF) heating system has been operated for eleven years since its completion. Recently, rate of troubles caused by aged deterioration of main components in the heating system is increasing year by year. To keep high availability of the heating system under such conditions and to proceed effective ICRF experiments, a usual checking system to make its performance sure or a rapid trouble shooting when troubles occurred, are required. So we have designed and developed a the diagnostic system which can provide an easy testing of various functions of the ICRF heating system without serious downtime . It was demonstrated that the diagnostic system developed is very useful for the trouble shooting and the various tests and adjustments.

Keywords: JT-60, ICRF Heating System, Diagnostic System, Availability

目 次

1. はじめに	1
2. イオンサイクロトロン高周波加熱装置の構成と保護機能	2
2.1 アンテナ結合系	4
2.2 整合回路	4
2.3 大電力増幅系	5
2.4 励振増幅系	7
3. 装置の異常発生と健全性診断システムの開発要求	8
4. 励振増幅系の健全性診断システム	10
4.1 システムの構成	10
4.2 システムの機能	11
5. 大電力増幅系の健全性診断システム	13
5.1 四極管増幅器運転動作領域と健全性診断の実際	13
5.2 四極管増幅器運転動作領域図を活用した限界出力調整	15
6. 成果の実例	17
7. まとめ	18
謝 辞	19
参考文献	20

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of ICRF Heating System and Protect System	2
2.1 Antenna System	4
2.2 Impedance Matching System	4
2.3 High Power Amplifier Line	5
2.4 Gain and Phase Controller Sircuit Line	7
3. Availability of the Devices and Development of Diagnostic System Required	8
4. Diagnostic System for Gain and Phase Controller Sircuit Line	10
4.1 Composition of the Diagnosis System	10
4.2 Function of the Diagnostic System	11
5. Diagnostic System for High Power Amplifier Line	13
5.1 Performance Chart of High Power Tetrode and Application of Diagnostic System	13
5.2 Adjustment of Limited Output Power Using the Performance Chart	15
6. Result and Example	17
7. Concluding Remarks	18
Acknowledgement	19
References	20

1. はじめに

高周波加熱装置は、核融合開発において有効なプラズマ加熱装置として位置づけられている。有効にプラズマを加熱するには、大電力高周波の電力と位相を繊細に制御することが要求されるとともに、信頼性の高い運転が必要となる。そのためには、異常の発生時では、速やかに不具合部の同定および原因調査等を可能にし、かつ同加熱装置の健全性を簡便、迅速に確認できる健全性診断システムの開発が要求された。

従来、大電力高周波加熱装置において異常が発生した場合、多系列の大電力増幅系の出力端に大電力模擬負荷装置を取り付けて、同加熱装置の全設備、機器を運転し、異常の原因調査、復旧および再調整を行っていた。これは、大電力模擬負荷装置との切り替え作業および大電力増幅系を運転するための高電圧電源と大容量の水冷却設備の運転を必要とする。これらの作業および運転には多くの時間と労力を要するため、迅速な健全性診断の障害となっていた。この問題を克服するために、JT-60高周波加熱装置の大電力増幅系以外では、その構成設備のうち、装置性能の鍵となる制御機能を有する励振増幅系を単独で作動できる健全性診断システムを考案し、迅速にかつ少人数で、不具合の原因調査、復旧および再調整を可能にした。また、MWレベルまでの大電力高周波増幅系では、主要部品である大電力四極管を最も適した運転動作状態に調整するために、大電力四極管最適運転動作領域図を考案し、大電力管の健全性診断を行っている。大電力四極管最適運転動作領域図の活用により、無理なく高出力で信頼高い運転領域の動作を可能にした。これらによって、本高周波加熱装置全体の高い健全性を確保維持し、安定かつ効果的な運転を実施し、高周波プラズ

マ加熱実験に多大に貢献した。

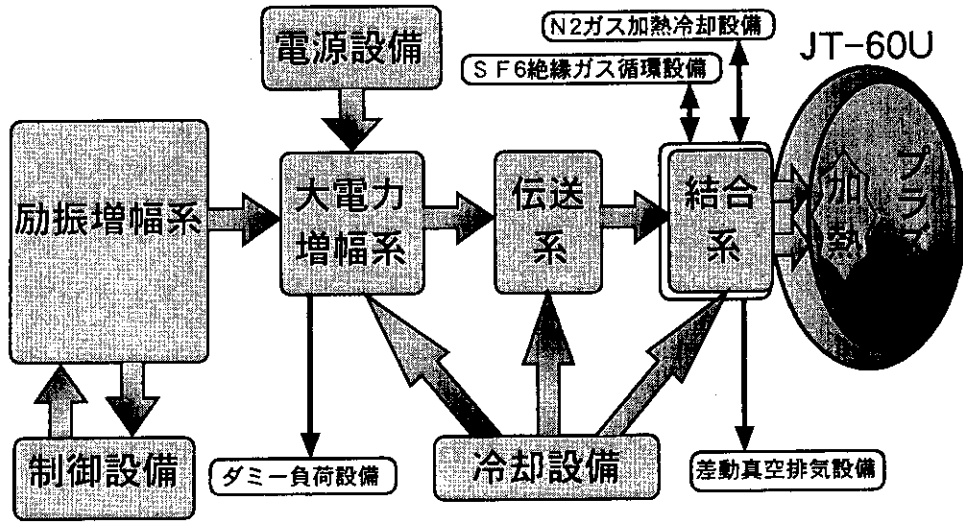
2. イオンサイクロトロン高周波加熱装置の構成と保護機能

J T-6 0における高周波（イオンサイクロトロン周波数帯）加熱装置^{1,2)}は、100 MHz帯の8 MW級大電力高周波によって、プラズマを加熱する装置であり、第1図に示すように、主に電源設備、励振増幅系、大電力増幅系、伝送系、結合系、制御設備、水冷却設備、N₂ガス加熱冷却設備、絶縁ガス循環設備、ダミー負荷設備、差動真空排気設備から構成されている。第2図にJ T-6 0高周波加熱装置における高周波系設備の概略構成図を示す。励振増幅系においては、標準信号発生器で発生した数mWの微小電力高周波を8系列に分配し、それぞれの系列で10 Wレベルまでに増幅するとともに高周波出力の電力、位相を一定に制御する等、多くの高周波パラメータ制御機能を持つ。更に、大電力増幅系では4段増幅にて、1 MWの高周波電力に増幅する。増幅された大電力高周波を結合系の8個のアンテナに伝送し、合計8 MW級の大電力高周波をプラズマ中へ放射する。プラズマ加熱を効果的にするためには、各アンテナにおける高周波電力と各系列アンテナ間の高周波位相差を制御する必要がある。高周波設備は、非常に多くの精密な電子部品を使用しており、近年、電子部品の経年劣化等（装置が駆動してから11年を経過）による異常の発生頻度が年々増加し、且つ不具合部の同定とその復旧に非常に多くの時間と労力を要していた。特に高周波設備は、運転中に異常が発生すると高周波加熱装置の総合性能に重大な支障をきたすので、高周波加熱装置の健全性を定常的に確保するためには、各設備機器の不具合による異常を効率良く、速やかに診断できる健全性診断システムの開発が重要となった。

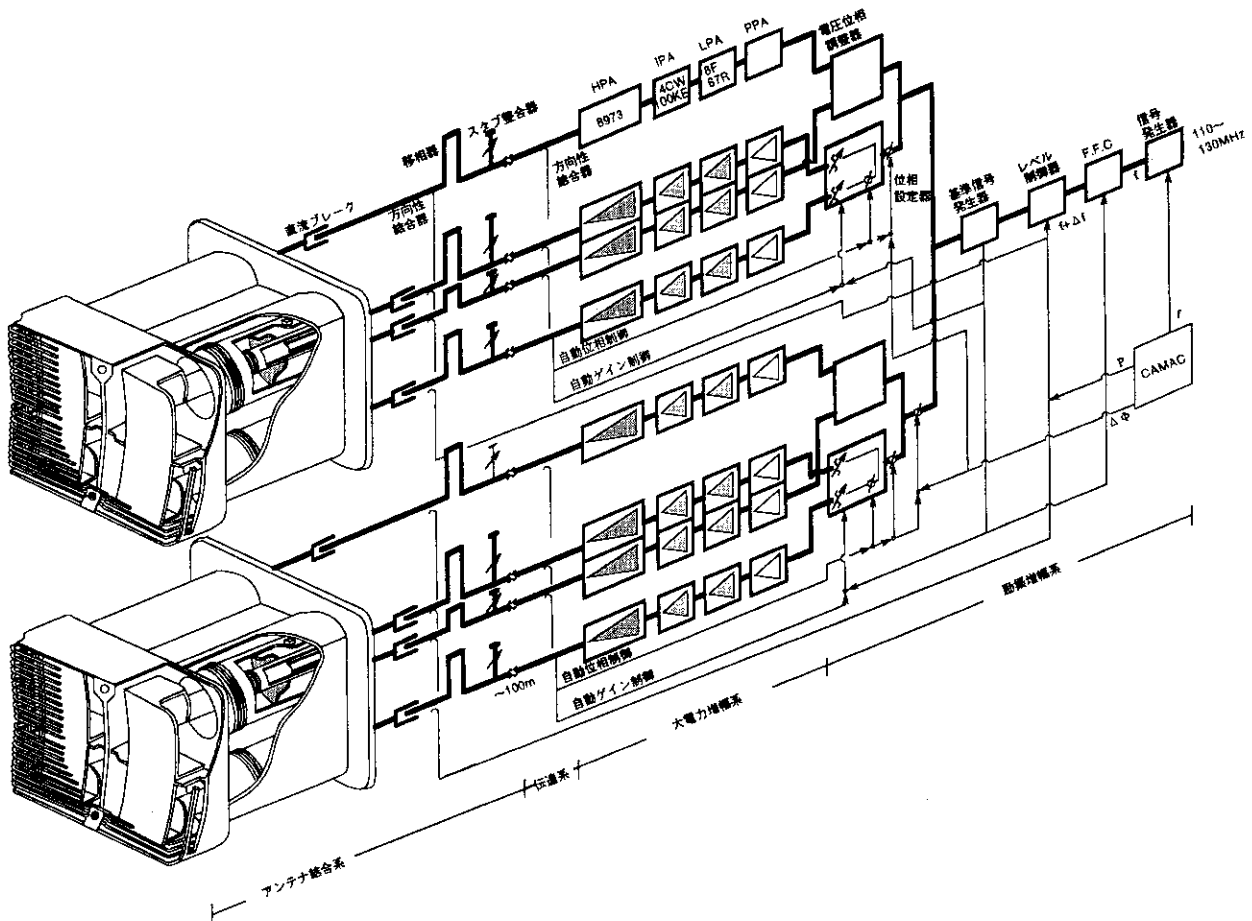
マ加熱実験に多大に貢献した。

2. イオンサイクロトロン高周波加熱装置の構成と保護機能

J T-6 0における高周波（イオンサイクロトロン周波数帯）加熱装置^{1,2)}は、100 MHz帯の8 MW級大電力高周波によって、プラズマを加熱する装置であり、第1図に示すように、主に電源設備、励振増幅系、大電力増幅系、伝送系、結合系、制御設備、水冷却設備、N₂ガス加熱冷却設備、絶縁ガス循環設備、ダミー負荷設備、差動真空排気設備から構成されている。第2図にJ T-6 0高周波加熱装置における高周波系設備の概略構成図を示す。励振増幅系においては、標準信号発生器で発生した数mWの微小電力高周波を8系列に分配し、それぞれの系列で10 Wレベルまでに増幅するとともに高周波出力の電力、位相を一定に制御する等、多くの高周波パラメータ制御機能を持つ。更に、大電力増幅系では4段増幅にて、1 MWの高周波電力に増幅する。増幅された大電力高周波を結合系の8個のアンテナに伝送し、合計8 MW級の大電力高周波をプラズマ中へ放射する。プラズマ加熱を効果的にするためには、各アンテナにおける高周波電力と各系列アンテナ間の高周波位相差を制御する必要がある。高周波設備は、非常に多くの精密な電子部品を使用しており、近年、電子部品の経年劣化等（装置が駆動してから11年を経過）による異常の発生頻度が年々増加し、且つ不具合部の同定とその復旧に非常に多くの時間と労力を要していた。特に高周波設備は、運転中に異常が発生すると高周波加熱装置の総合性能に重大な支障をきたすので、高周波加熱装置の健全性を定常的に確保するためには、各設備機器の不具合による異常を効率良く、速やかに診断できる健全性診断システムの開発が重要となった。



第1図 高周波加熱装置の概念構成図



第2図 高周波設備の概略構成図

2.1 アンテナ結合系

アンテナは高周波エネルギーをプラズマへ放射するための装置で、JT-60 本体真空容器ポートとベローズで取り合い、アンテナの自重とプラズマディスラプション時の電磁力は高周波設備架台で支えられる。アンテナは2機で4本のループアンテナ素子が2行2列に配列され、各自8本独立に特性インピーダンス 50Ω の同軸管により高周波がアンテナに給電される。各中心導体に流れる高周波電流の系統間位相差は制御される。各アンテナは中心導体、同軸管の内外導体、フェラデーシールド、アンテナケーシング、フィードスルー等で構成されている。真空窓であるフィードスルーは安全のために各系統毎に2段になっており、1段目はアンテナの近くに配置されているが、2段目はポートの外側の交換可能な位置に置かれ、通常は第1段フィードスルーの前まで絶縁ガスであるSF₆ガスを循環させている。第1段フィードスルーが損傷し真空リークが発生した場合には第1段と第2段のフィードスルーの間を差動真空排気して実験が継続できる構造としている。

2.2 整合回路

整合回路は、インピーダンス整合を行うスタブ整合器、位相を制御する位相器、直流を絶縁する直流ブレイク、高周波電力を計測する方向性結合器等から構成する。アンテナ入力インピーダンスは、伝送系の特性インピーダンスと大きく異なるため、スタブ整合器を用いてインピーダンス整合を行っている。整合調整は、RF入射中のスタブ位置スキャンと周波数フィードバック制御の組合せで行なう。また、ス

タブのアンテナ側および発振器側に取り付けられた方向性結合器により得られる入反射電力と位相のデータから、自動的に整合スタブ位置および整合移相器位置を算出できる。スタブ整合器は、外径152mmの同軸管の外導体と内導体の間に設けられた筒状の短絡素子を遠隔操作にて駆動し、外導体内導体の短絡位置を変えることにより、アンテナと伝送線路のインピーダンス整合を行う。スタブ整合器には音センサーが付属し、内部で発生する放電等を音により検知して、スタブ整合器の損傷を保護している。

2.3 大電力増幅系

大電力増幅系は高周波電力を1KWレベルから1MWレベルまで増幅する大電力増幅管と固体増幅器との集合体である。大電力増幅系は全8列の高周波増幅器列から構成され、各増幅器の構成は、

- (1) 1KW級の固体化された広帯域増幅器である前置増幅器
- (2) 10KW級の四極管（東芝8F67R）を使用した低電力増幅器
- (3) 100KW級四極管（東芝4CW100KE）を使用した中間電力増幅器
- (4) 1MW級四極管（CPI 8973）および四極管（CPI 4CM2500KG）を使用した大電力増幅器

の四段増幅より構成する。

大電力増幅系の1MW級最終段増幅器である大電力四極管の構造図を第3図に示す。中間電力増幅器により100KWレベルまで増幅された高周波は入力ポートから入力され、入力同調回路を經由して大電力四極管で1MWレベルまで増幅される。増幅された高周波は出力同調回路を經由して、出力ポートより伝送系同軸管を伝送して、JT

—60のプラズマへ放射される。JT-60のようなプラズマ負荷の場合は、プラズマが変化することにより負荷インピーダンスが変動し、大きな反射波が最終段の大電力四極管に帰ってくる。その結果四極管の動作条件が変わり、四極管の異常動作を起こし、増幅器内でのアーキングの原因となる。JT-60の場合、負荷変動のない通常の四極管増幅器の動作状態とかなり異なり、このような反射波から四極管を保護するために、本加熱装置は負荷の電圧定在波比 (V.S.W.R) : 1.5 に耐えられるよう余裕を持った設計としている。更にVSWR 1.5 以上の負荷変動から四極管を保護するためいくつかの保護装置を設けている。また、大電力増幅器の調整不良も同じように四極管内のアーキングの原因となるため、定期的な大電力四極管の点検調整は、最適な動作条件を得る重要な項目となっている。

大電力四極管の保護装置には以下に示すように、各電極電流の過電流を検出するものと、過大反射波を検出するものがある。

(1) 各電極電流の過電流検出

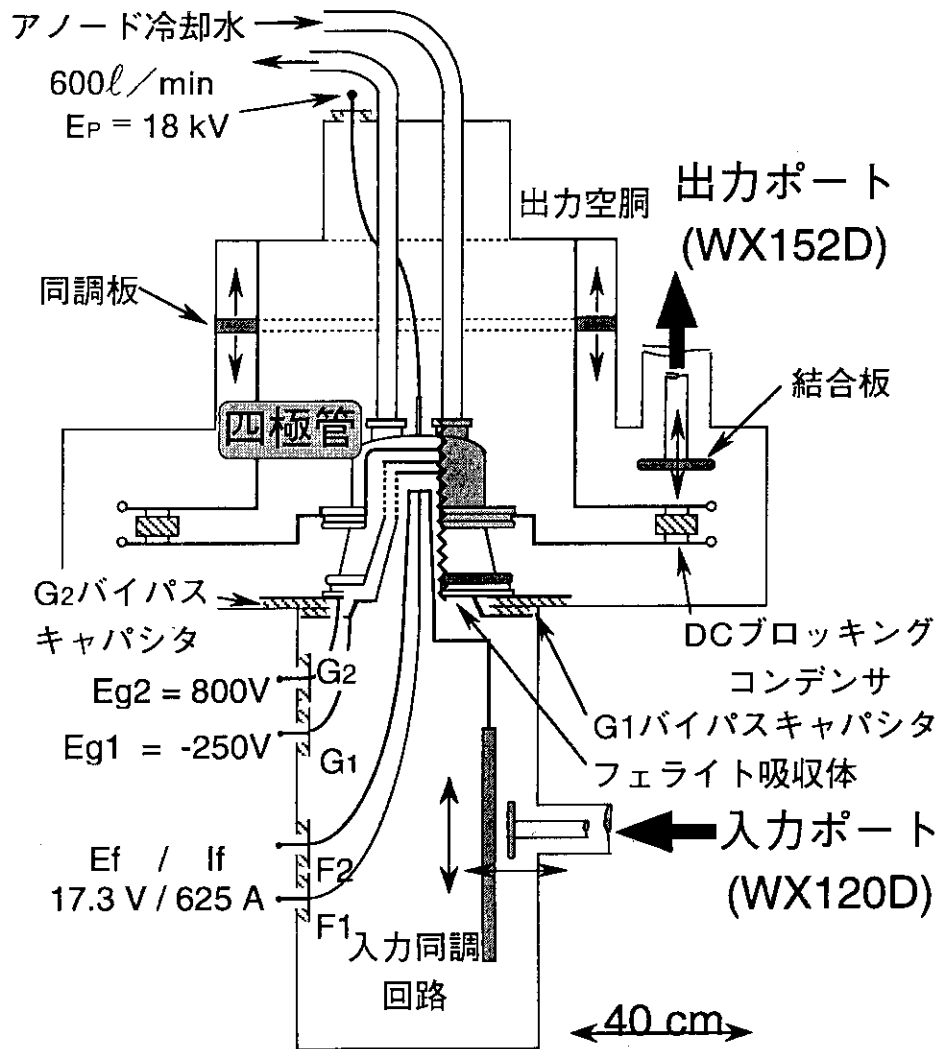
カソード (I_k) 過電流、コントロールグリッド (I_{g1}) 過電流、スクリーングリッド (I_{g2}) 過電流を検知し、電磁接触器において各電極電源を遮断すると共にガス遮断器にてプレート電源を遮断する。

(2) プレート電流の過電流検出

クローバ回路によってプレート電源を高速遮断し、ガス遮断器が動作するまでに四極管内に流入する電流を抑制する。

(3) 過大反射の検出

電力検波器において常に反射波をモニタし、設定値以上の反射波が検出された場合は、大電力増幅系の入力電力を高速遮断する。



第3図 1 MW級最終段増幅器の構造図

2.4 励振増幅系

標準信号発生器で発生した数mWの微小電力高周波を、レベル制御器、位相設定器を介して8系列に分配し、大電力増幅系にて1 MW近くに増幅する。励振増幅系はこの高周波系の初段に当り、大電力増幅

系前段までの高周波の発振、分配を行なうとともに、大電力増幅系の電力や位相を一定にする。ループアンテナ素子の位相制御も実施する。また、変動するプラズマ負荷に対するアンテナのインピーダンス整合や、装置の健全性維持とアンテナコンディショニングの効率化を両立する保護装置を有し、これらの制御機能をつかさどる電子回路網が組込まれている。

保護回路の代表的例としてノッチング機能について以下に説明する。大電力増幅器は、負荷からの反射電力によって出力の制限を受ける。反射率の小さい領域では、管内放電がおこる条件で出力制限を決定し、反射率の大きい領域では、利得異常に対する保護回路の動作領域で出力制限を決定する。このように、大電力増幅器の有効電力は、反射率の増大とともに減少する。アンテナ内における絶縁破壊が原因で反射率が急増すれば大電力の保護回路が作動して、パルス中に入射を停止させる。しかし、アンテナエージングの効率化を進めるには、ある程度の放電を許しながら、実施していく必要がある。ここでノッチング機能として、反射率の異常を検出すれば瞬時（ $100\mu\text{s}$ ）にRFを遮断し、 $2\sim 10\text{ms}$ 後に入射を再開、また放電がおこれば何度もそのプロセスを繰り返す機能がある。また結合系の保護のために、定在波最大電圧が設定レベルを越えないように、入射電力を制御する回路や大電力増幅器の保護のために反射電力が設定レベルを越えないように、入射電力を自動的に制御する機能を有している。

3. 装置の異常発生と健全性診断システムの開発要求

高周波加熱装置における健全性診断システムの開発に当たって、異常の発生状況、原因およびその復旧に要する時間等を調査、分析した。

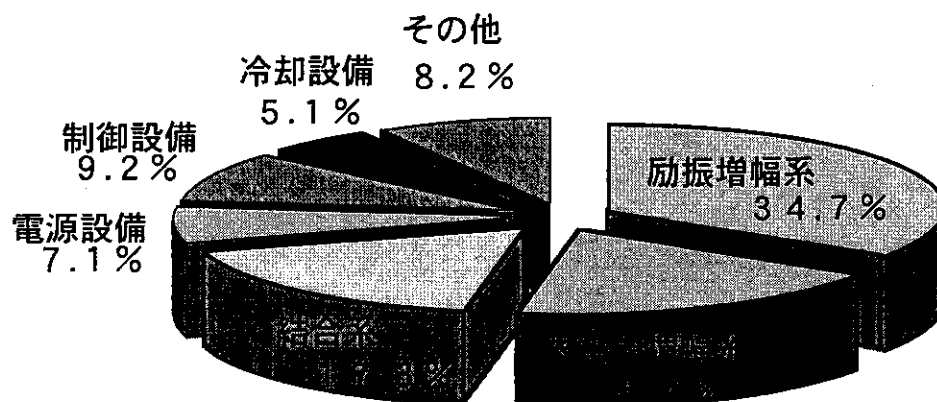
系前段までの高周波の発振、分配を行なうとともに、大電力増幅系の電力や位相を一定にする。ループアンテナ素子の位相制御も実施する。また、変動するプラズマ負荷に対するアンテナのインピーダンス整合や、装置の健全性維持とアンテナコンディショニングの効率化を両立する保護装置を有し、これらの制御機能をつかさどる電子回路網が組込まれている。

保護回路の代表的例としてノッチング機能について以下に説明する。大電力増幅器は、負荷からの反射電力によって出力の制限を受ける。反射率の小さい領域では、管内放電がおこる条件で出力制限を決定し、反射率の大きい領域では、利得異常に対する保護回路の動作領域で出力制限を決定する。このように、大電力増幅器の有効電力は、反射率の増大とともに減少する。アンテナ内における絶縁破壊が原因で反射率が急増すれば大電力の保護回路が作動して、パルス中に入射を停止させる。しかし、アンテナエージングの効率化を進めるには、ある程度の放電を許しながら、実施していく必要がある。ここでノッチング機能として、反射率の異常を検出すれば瞬時（ $100\mu\text{s}$ ）にRFを遮断し、 $2\sim 10\text{ms}$ 後に入射を再開、また放電がおこれば何度もそのプロセスを繰り返す機能がある。また結合系の保護のために、定在波最大電圧が設定レベルを越えないように、入射電力を制御する回路や大電力増幅器の保護のために反射電力が設定レベルを越えないように、入射電力を自動的に制御する機能を有している。

3. 装置の異常発生と健全性診断システムの開発要求

高周波加熱装置における健全性診断システムの開発に当たって、異常の発生状況、原因およびその復旧に要する時間等を調査、分析した。

同装置における各設備の異常発生割合を第4図に示す。



第4図 高周波加熱装置各設備の異常発生割合

高周波系設備（励振増幅系、大電力増幅系、結合系）における異常発生割合は、70%と高く、また、特に励振増幅系における不具合の同定やその復旧に多くの時間を費やしていることが判明した。

励振増幅系は各ループアンテナ素子における高周波電力やその位相差を自動的に、所定の値に設定するフィードバック制御機能、更に、高周波電力を効率良くアンテナに伝送する機能（整合機能）やアンテナの耐電力を効果的に改善する機能（コンディショニング機能）のために、部品構成が極めて繊細かつ複雑であり、かつ多数の精密な電子部品を用いている。そのため、励振増幅系は、電子部品の経年劣化による異常の発生の増加が危惧されていた。また、大電力増幅系においても安定した高周波電力の増大が望まれ、大電力増幅管の動作領域拡大の見直しが必要となった。

励振増幅系の高周波電力制御および異なる系列間の位相制御を含めた異常調査を行うためには、従来、大電力増幅系を介してのフィードバック制御回路が必要であるため、大電力増幅系の同時運転が

不可欠であった。一方、異常発生時に大電力増幅系を運転するには、大電力増幅系の出力端に接続されていた伝送系用同軸管の全て（8本）を取り外し、新たに、大電力模擬負荷装置を系列毎に接続し、更に、高電圧電源設備および大容量の水冷却設備を運転する必要がある。これらの作業には、多くの時間を要するため、迅速な健全性診断の障害となっていた。この問題を克服するために、大電力増幅系との同時運転を必要としないで、励振増幅系のみを作動させることにより、効率良く、速やかに健全性診断できるシステムを考案し、開発した。また、大電力増幅系では四極管動作状態を図式化して、安定動作領域を明確化した。それにより、限界まで出力を増大させても安全かつ安定に運転ができることを実証した。

4. 励振増幅系の健全性診断システム

4.1 システムの構成

第5図に励振増幅系健全性診断システムの概略系統図を示す。励振増幅系内既設の電力/位相調整器と10Wアンプの間に可変減衰器および位相器を、10Wアンプと大電力増幅系の間に切替器-1を、また大電力増幅系の出力を測定する方向性結合器と電力/位相調整器の間に切替器-2を設置した。これらを、他の2系列から8系列まで同様に設置した。切替器-1と-2により、同図に示したように大電力増幅系を介さず、励振増幅系のフィードバック制御の模擬ループ回路を形成する。健全性システム制御盤のスイッチにより、全ての切替器は電氣的に自動動作し、この制御模擬ループ回路をつくる。これが「健全性診断試験モード」であり、各種の健全性診断ができる状態に

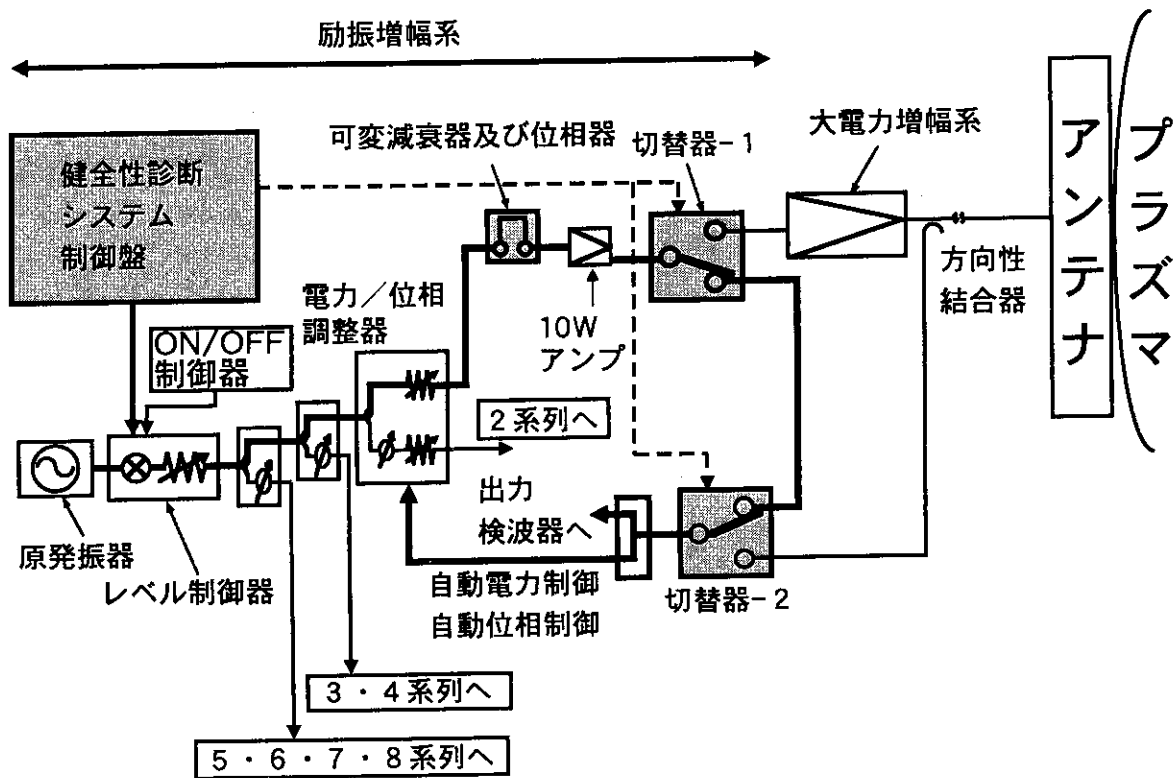
不可欠であった。一方、異常発生時に大電力増幅系を運転するには、大電力増幅系の出力端に接続されていた伝送系用同軸管の全て（8本）を取り外し、新たに、大電力模擬負荷装置を系列毎に接続し、更に、高電圧電源設備および大容量の水冷却設備を運転する必要がある。これらの作業には、多くの時間を要するため、迅速な健全性診断の障害となっていた。この問題を克服するために、大電力増幅系との同時運転を必要としないで、励振増幅系のみを作動させることにより、効率良く、速やかに健全性診断できるシステムを考案し、開発した。また、大電力増幅系では四極管動作状態を図式化して、安定動作領域を明確化した。それにより、限界まで出力を増大させても安全かつ安定に運転ができることを実証した。

4. 励振増幅系の健全性診断システム

4.1 システムの構成

第5図に励振増幅系健全性診断システムの概略系統図を示す。励振増幅系内既設の電力/位相調整器と10Wアンプの間に可変減衰器および位相器を、10Wアンプと大電力増幅系の間には切替器-1を、また大電力増幅系の出力を測定する方向性結合器と電力/位相調整器の間に切替器-2を設置した。これらを、他の2系列から8系列まで同様に設置した。切替器-1と-2により、同図に示したように大電力増幅系を介さず、励振増幅系のフィードバック制御の模擬ループ回路を形成する。健全性システム制御盤のスイッチにより、全ての切替器は電氣的に自動動作し、この制御模擬ループ回路をつくる。これが「健全性診断試験モード」であり、各種の健全性診断ができる状態に

なる。また、切替器-1と-2を同図と逆方向に切り替えれば、正規の「高周波加熱運転モード」の状態となる。



第5図 励振増幅系健全性診断システムの概略系統図

4.2 システムの機能

健全性診断システムは、複雑な作業を伴わないで、高周波電力や位相をフィードバック制御する模擬ループ回路を形成することができる。

あわせて装置、機器を誤動作や操作ミスから保護するインターロック機能を有している。以下に代表的な健全性診断の試験例を示す。

(1) 自動電力制御回路の試験

新規に取り付けた可変減衰器の減衰量を変化させて、出力検波器の信号をモニターすることによって、自動電力制御回路の正常動作を確認する試験が行える。減衰量を変化させても、電力/位相調整器が機能して、モニター信号の大きさが一定である時が正常動作となる。もし、異常があれば、出力検波器の信号の大きさが変化することから、自動電力制御回路の健全性診断が瞬時にできる。

(2) 自動位相制御回路の試験

出力検波器に原発振器との位相差を測定する計測器（例えばネットワークアナライザ）を取り付けて、新規に取り付けた位相器の位相を変化させて、位相差信号をモニターする。位相調整器が正常に動作していれば、位相差信号は変化しない。このように、位相差信号をモニターすることにより、自動位相制御回路を迅速に健全性診断ができる。

(3) 出力検波器の試験

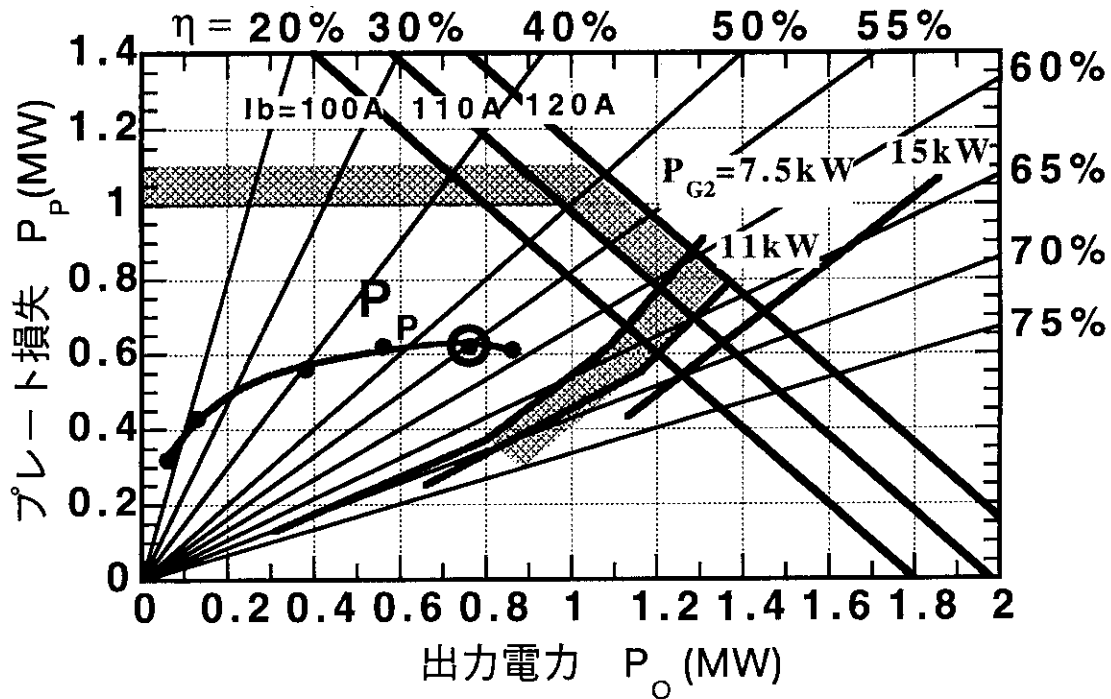
本システムを利用して、出力検波器に10Wアンプから出力された高周波を簡単に入力することができる。そのときの出力波形をオシロスコープ等にて測定すれば出力検波器の試験が、適時必要に応じて行える。この試験で得た出力検波器の較正值は、高周波加熱装置の最終出力電力を決定する上で最も重要なデータを提供する。

5. 大電力増幅系の健全性診断システム

5.1 四極管増幅器運転動作領域と健全性診断の実際

大電力四極管増幅器^{3~7)}のプラズマ負荷での高出力運転と大電力管の損傷防止を両立するために、最も適した運転動作状態を管理維持できる健全性診断用、「四極管増幅器運転動作領域図」の作成と利用法を考案した。

第6図に8973四極管増幅器の運転動作領域図を示す。




第6図 最終段四極管増幅器の運転動作領域図

図の横軸は増幅器出力 P_o (MW)を表し、図の縦軸はプレート損失 P_p (MW)を表す。原点から放射状に伸びる直線は増幅器能率 η を表し、能率 η は

$$\eta = P_o / (P_o + P_p) \times 100 (\%)$$

の式で導かれる。また、右下がりの等間隔の3本の直線はプレート電流 I_b (A)、右上がりの折れ点線はスクリーン損失 P_{g2} (kW)を表す。図の中で四極管が損傷しないで安全に動作できる条件は以下の条件で決定する。

- (1) プレート損失 $P_p = 1.0$ (MW)以下
(この値は製造メーカーの定めた定格値)
- (2) プレート電流 $I_b = 110$ (A)以下
(この値は最終段増幅器に供給する電源容量の限界値で、この値を越えた供給はできない)
- (3) スクリーン損失 $P_{g2} = 7.5$ (kW)以下
(この値は製造メーカーの定めた定格値)

以上の条件から、それら許容値によって囲まれた領域（図の 部分内側）が大電力四極管の安全動作運転領域であることを表す。

四極管増幅器運転動作領域図上に、出力試験データの増幅器出力 P_o に対するプレート損失 P_p をプロットし、グラフ化したものが図中の弓形をした曲線であり、この曲線を四極管動作線とよぶ。四極管動作線から η 及び I_b も読みとれる。実際のプラズマ負荷運転時には、負荷インピーダンスが変化すると四極管動作線が上下方向に変動するので、ある程度変動しても安全運転領域から出ないように、余裕を持たせた動作点（第6図では P_o が750KWで η は55%）とすることが必要

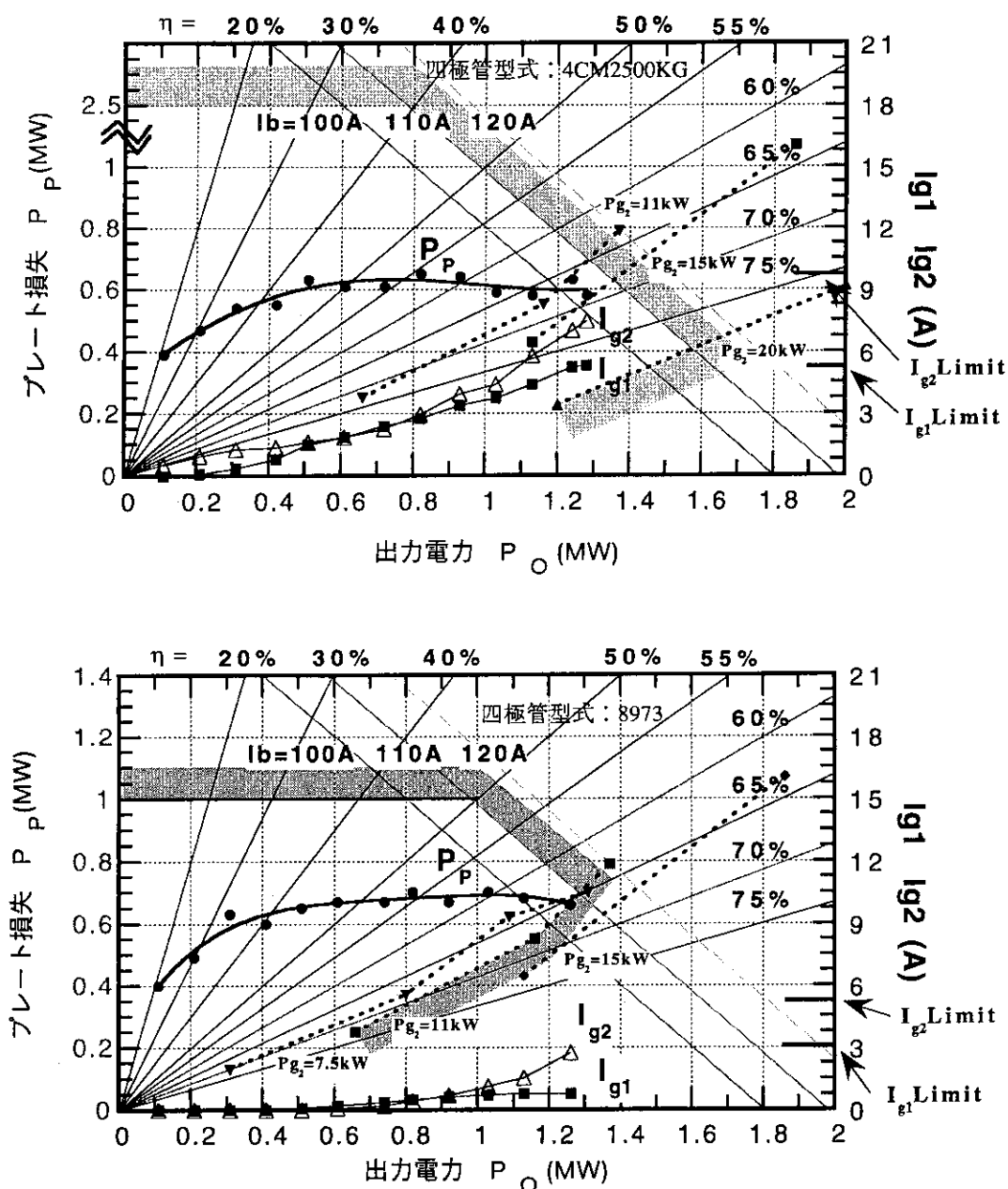
となる。このように、四極管の動作状態を図式化して利用することにより、大電力増幅管の健全性を診断できることを可能とした。現在、本設備ではMW級四極管が常時8台運転されており、定期的に各四極管の運転動作領域図を作成しながら再調整し、最良の条件で運転を実施している。

5.2 四極管増幅器運転動作領域図を活用した限界出力調整

四極管増幅器運転動作領域図により、各四極管の動作状態が良く把握できることが可能になり、定格出力から限界出力までのより高出力を発生する運転ができる可能性がでてきた。本加熱装置では11年間の運転により、大電力増幅管のエージング（枯化）が進み管内のガス発生量が減少したことや増幅器の出力が3秒間のパルス出力運転が主流になったことなどを機会に、より大きなスクリーン損失 P_{g2} が許容されると判断し、 P_{g2} の許容値を7.5kWから11kWとし安全運転領域を拡大すると共にスクリーングリッド電圧を800Vから1200Vに変更した。また、比較的大電流を流した時の電圧の安定度を向上させるために、ブリーダ抵抗及びコンデンサの直列数を4組から8組に変更した。さらに、スクリーングリッド電圧の変更に伴い、コントロールグリッド電圧も-250Vから-490Vへ変更した。また、出力結合板と同調板の微調整をする事によりプレートインピーダンス R_p の最適化を行った。結合板を上げると R_p が大きくなり、四極管動作線は図上で下方へ移動し、結合板を下げると R_p が小さくなり、四極管動作線は図上で上方へ移動、動作領域が拡大した。

四極管増幅器運転動作領域図の考案により、複雑な大電力増幅管の診断調整ができるようになり、増幅管の限界出力にまで運転動作領

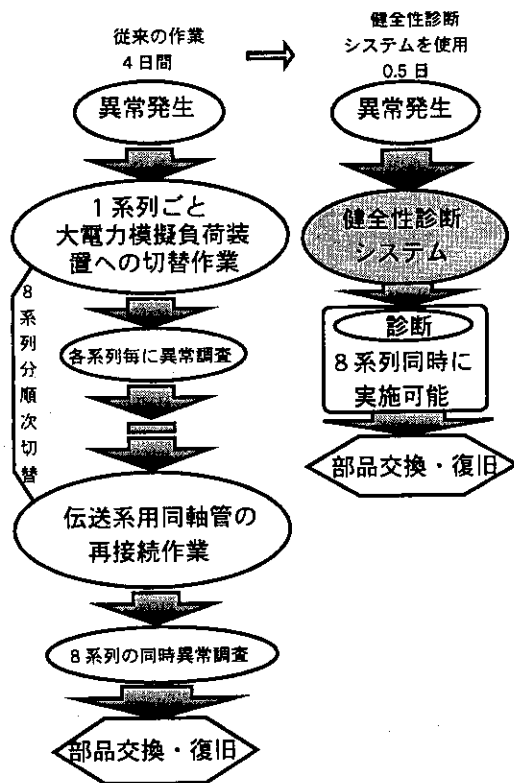
域を拡大することができた。第7図に現在駆動中8台の中から大電力増幅器の限界出力調整を実施した4CM2500KG型四極管と8973型四極管の代表的運転動作領域図を示す。出力は従来の定格出力750KWから1~1.2MWへの増力に成功し、8系統合計8MW以上の能力を引き出すことに成功した。



第7図 健全性診断を実施した最終段増幅器4CM2500KG、8973の運転動作領域図

6. 成果の実例

高周波加熱装置による実験運転中に、高周波出力電力に振動が観測され、励振増幅系の異常が疑われた。開発したこの健全性診断システムを使用して、異常箇所の診断を実施した結果、自動電力制御回路に異常を確認した。更に詳しく調査したところ、電力/位相調整器電力制御用基板上的フォトカプラー素子の不具合を発見し、この素子を交換することによって、速やかに0.5日で正常動作に復旧できた。従来では、4日間を費やして、不具合の同定や原因調査および復旧作業を行っていたが、3.5日も短縮することができ、半日間で正常運転に復旧することが可能となった。第8図に健全性診断システムの活用前と活用後の原因調査作業の違いをフローチャートにして示す。



第8図 開発した健全性診断システムの成果例

また、JT-60の高周波加熱装置実験に先行して実施する必要があるシステム全体健全性試験（自動電力制御回路、自動位相制御回路と出力検波器および各種インターロック機能の診断）が、この診断システムを活用することにより、簡便にかつ短期間（1日）で行えるようになった。従来は、大電力増幅系の出力端に大電力模擬負荷装置を取り付けて、全設備の機器を運転して、1系列ごとに高周波加熱装置全体の健全性確認試験を実施していたため、1週間という長期間を要していた。

7.まとめ

開発した健全性診断システムを使用することにより、JT-60高周波加熱実験中に発生した異常の原因調査やその復旧を極めて迅速に行え、更に実験前に高周波加熱装置の健全性を簡便に確認できるようになり、高周波加熱の実験効率を高めた。また、大電力増幅管では、運転動作状態を図式化することで、最も適した動作領域で運転を行い維持することが可能となり信頼性が格段に向上した。増幅器出力においても定格より平均33%の増大に成功した。

- (1) JT-60の高周波（イオンサイクロトロン周波数帯）加熱装置における異常現象の発生状況と原因および復旧に要する時間等の調査、分析を実施した。
- (2) 調査分析に基づいて、同高周波加熱装置の健全性診断を行うための健全性診断システムの考案および設計、製作を実施した。
- (3) 開発した健全性診断システムをJT-60高周波加熱装置に組み込み、本システムの健全性診断機能の試験、評価を実施した。

また、JT-60の高周波加熱装置実験に先行して実施する必要があるシステム全体健全性試験（自動電力制御回路、自動位相制御回路と出力検波器および各種インターロック機能の診断）が、この診断システムを活用することにより、簡便にかつ短期間（1日）で行えるようになった。従来は、大電力増幅系の出力端に大電力模擬負荷装置を取り付けて、全設備の機器を運転して、1系列ごとに高周波加熱装置全体の健全性確認試験を実施していたため、1週間という長期間を要していた。

7.まとめ

開発した健全性診断システムを使用することにより、JT-60高周波加熱実験中に発生した異常の原因調査やその復旧を極めて迅速に行え、更に実験前に高周波加熱装置の健全性を簡便に確認できるようになり、高周波加熱の実験効率を高めた。また、大電力増幅管では、運転動作状態を図式化することで、最も適した動作領域で運転を行い維持することが可能となり信頼性が格段に向上した。増幅器出力においても定格より平均33%の増大に成功した。

- (1) JT-60の高周波（イオンサイクロトロン周波数帯）加熱装置における異常現象の発生状況と原因および復旧に要する時間等の調査、分析を実施した。
- (2) 調査分析に基づいて、同高周波加熱装置の健全性診断を行うための健全性診断システムの考案および設計、製作を実施した。
- (3) 開発した健全性診断システムをJT-60高周波加熱装置に組み込み、本システムの健全性診断機能の試験、評価を実施した。

- (4) JT-60 高周波加熱装置において、迅速な健全性診断や簡便な健全性確認が可能となったことを実証した。〔健全性診断システムの有効性を実証〕
- (5) 大電力増幅管〔四極管〕の動作領域の拡大と限界出力運転が、健全性診断用に考案した動作領域図の活用により可能となった。

謝 辞

本開発を考案、具体化、完成させるまでに、多くの技術者の方々の貴重な技術力と援助を得ました。本システムの設計製作、各種開発試験では業務協力員の五十嵐浩一氏、佐藤臣夫氏、前RF装置試験室藤井常幸主任研究員、大電力四極管の出力調整、試験等では(株)東芝の小川芳郎氏の貴重な御意見、御指導を頂きました。厚くお礼申しあげます。

本開発を実施するに当たり御指導、御配慮頂きました核融合装置試験部船橋昭昌部長、同部清水正亜次長、RF装置試験室山本 巧室長にお礼申しあげます。

- (4) JT-60 高周波加熱装置において、迅速な健全性診断や簡便な健全性確認が可能となったことを実証した。〔健全性診断システムの有効性を実証〕
- (5) 大電力増幅管〔四極管〕の動作領域の拡大と限界出力運転が、健全性診断用に考案した動作領域図の活用により可能となった。

謝 辞

本開発を考案、具体化、完成させるまでに、多くの技術者の方々の貴重な技術力と援助を得ました。本システムの設計製作、各種開発試験では業務協力員の五十嵐浩一氏、佐藤臣夫氏、前RF装置試験室藤井常幸主任研究員、大電力四極管の出力調整、試験等では(株)東芝の小川芳郎氏の貴重な御意見、御指導を頂きました。厚くお礼申しあげます。

本開発を実施するに当たり御指導、御配慮頂きました核融合装置試験部船橋昭昌部長、同部清水正亜次長、RF装置試験室山本 巧室長にお礼申しあげます。

参考文献

- 1) T. Fujii, N. Kobayashi, S. Moriyama, et al. Upgrade of JT-60 ICRF Heating System, Proc. 16th Symp. on Fusion Technology, (London), 2, 1171-1175 (1990)
- 2) S. Moriyama, T. Fujii, M. Saigusa, K. Anno, K. Yokokura, et al. Proc. 17th Symp. on Fusion Technology, (Rome), 584-588 (1992).
- 3) S. Moriyama, Y. Ogawa, et al. Test Results of X2242 and X2274 high power tetrodes with the JT-60 ICRF amplifier in a Frequency range of 110-130 MHz. Fusion Engineering and Design, 19, 41-52 (1992).
- 4) S. Moriyama, Y. Ogawa, et al. JT-60 System High Power 110 to 130MHz Test Results with an X2242 Tetrode., Proc. IEEE 13th Symp. on Fusion Engineering, (Knoxville), 2, 1424-1427 (1989)
- 5) W.G. Wagener, Simplified Methods for Computing Performance of Transmitting Tubes Publication No. ST - 53 (1937)
- 6) EIMAC Division of Varian Tube Performance Computer Detailed Instructions No-5 (1967)
- 7) 倉石源三朗著；テレビとFM放送術. 第4章 P.147~197