プラズマ加熱用中性粒子入射装置の技術開発 **Technical Development of Neutral Beam Injectors for Plasma Heating**

中性粒子入射装置は、核融合装置でのプラズマの有効な追加加熱装置として最近 非常に重要視されているが、各国共その開発には努力を傾注しており、その構造も 固まりつつある。

日立製作所は,日本原子力研究所,京都大学及び筑波大学から中性粒子入射装置 に関連した機器の設計や製作を受注し、それぞれ納入又は製作中である。これらの 設計,製作に当たり,試験研究を行ない成果を得ている。それらの中から、特に、イ オン軌道計算,磁気シールド計算と実測,サージブロックコアの解析,真空排気系 の過渡的シミュレーション計算, イオン源用電源の解析, ビームダンプの熱解析, クライオパネルの液体ヘリウムの観察などについて報告する。

磯部昭	l <u> </u> *	Shôji Isobe
上出泰	生**	Taisei Uede
橋本	勲**	Isao Hashimoto
藪野光	;平***	Mitsuhei Yabuno
佐藤	忠***	Tadashi Satô
西村秀	;矢口***	Hidetomo Nishimura
前川明	副嗣****	Akigi Maekawa
小泉	嶌**** 嶌	Makoto Koizumi
尾形久	_直*****	Hisanao Ogata

言 1 緒

NBI (Neutral Beam Injector:中性粒子入射装置)は、ミ ラー磁場でのプラズマを発生させるために開発されたもので あるが,現在ではトーラス磁場のプラズマの追加加熱用にも 用いられ, 1978年の I A E A (International Atomic Energy Agency), Innsbruck大会では、米国PLT(Princeton Large Tokamak)でNBIを用いて約7千万度のプラズマの加熱に成 功したと発表¹⁾された。また、ミラー磁場でも、1976年IAEA、 Berchtesgarden大会では、米国LLL(Lawrence Livermore Laboratory)の"2XIIB"でNBIを用いて約1億度のプラ ズマの加熱に成功したと発表された²⁾。

一般である。イオン源は各所で開発が進められているが,日 立製作所では図2に示すようなイオン源用テストスタンドで 研究を行なっている。このテストスタンドのイオン源は、バ ケット形イオン源であり、モリブデンの電極を使用し、3枚 の電極を球面加工したものを用いている。

このように, NBIは核融合装置の必須装置として成長し つつあり, 各国共にその研究開発を強力に推進しつつある。

日立製作所は、日本原子力研究所から"JT-60"NBI原形 ユニット詳細設計,各種委託研究を受注し,納入した。筑波 大学からは、ミラー型核融合実験装置"GAMMA-6"のNBI のイオン源及び電源装置を受注し,納入した。現在は,日本 原子力研究所"JT-60"用NBI原型ユニット真空排気系,京 都大学「ヘリオトロンE」用NBIを製作中である。これらの 装置の製作中には各発注先から指導を受け, NBIの各部分 について試験,研究を行なった。

本報告は、日立製作所での上記NBIの設計・製作に関す る研究成果をまとめて述べたものである。

2 NBIの構造

NBIビームラインは、大電流イオン源、中性化セル、偏向 磁石, ビームダンプ, カロリメータ, クライオポンプなどか ら構成される。図1に臨界プラズマ試験装置"JT-60"NBI 原型ユニットの場合の概略図³⁾を示す。NBIシステムは、上 記ビームラインとともに、ビームラインの運転に必要なイオ ン源用電源,補助真空排気系,クライオポンプ用の液体ヘリ ウムや液体窒素の循環系, ビームダンプ, カロリメータ, イ オン源用電源などの冷却に必要な純水冷却水系, NBIシス

イオン源から引き出された水素イオンビームは、中性化セ ル内の水素ガス中を通過することにより、高速の中性粒子ビ ームに変換される。このとき、外部磁界がある場合には水素 イオンビームが曲げられてしまうため、磁気シールドをイオ ン源及び中性化セルの外側に取り付けている。磁気シールド は、パーマロイ及び電磁軟鉄の二重シールドを採用している。 中性化セルで中性粒子ビームに変換されなかったイオンビ ムは, 偏向磁石で(又は外部磁場を利用して)曲げられ, ビー



61

テムの制御系などから構成される。

図 | "JT-60"用中性粒子入射装置ユニット イオン源の加速電圧は、核融合装置のプラズマ密度と長さ "JT-60"用NBI原型 ユニットビームラインの概略図を示す。 に関係し、電流はプラズマの体積に関係して定められるのが

* 日立製作所国分工場 工学博士 ** 日立製作所国分工場 *** 日立製作所日立研究所 **** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 ***** 日立製作所エネルギー研究所 ****** 日立製作所機械研究所

376 日立評論 VOL. 62 No. 5 (1980-5)



図2 イオン源用テストスタンド 日立製作所でイオン源の試作開発 を進めており、そのためのテストスタンドである。

ムダンプ表面にあてて減速させる。このとき、ビームダンプ へのイオンビームの入射角度を計算して、ビームダンプ表面 の熱負荷を下げるようにしている。

また,中性粒子ビームの再電離を少なくするため,後述す るようにビームラインの過渡的シミュレーション計算により 動的真空排気速度を計算して,クライオポンプの排気速度を 決定している。クライオポンプには,液体へリウムの自然循 環方式を採用することにより,定常の熱負荷とNBI入射時のパルス的な熱負荷に対し,安定したポンプの排気速度を確保するようにしている。

イオン源電源は、制御ケーブルに光ファイバを用い、また ケーブルにサージブロックコアを挿入し、対アース絶縁及び サージに対する対策を行なっている。

以下,各要素の試験研究結果について述べる。

3 イオン軌道の解析

中性粒子を効率よくプラズマに打ち込むためには、イオン の発散角が小さくなければならない。このイオン発散角は、 イオン源のイオンを引き出す加速電極、減速電極及び接地電 極に穿孔された、いわゆるアパチュアと称する小孔の形状や、 電極に印加される電圧、更には電極間の距離により大きな影 響を受ける。このため、電極構造の設計に際しては、イオン 発散角をあらかじめ計算により推測する必要がある。

この計算は、空間電荷を含む静電場を表わすポアソンの式、 静電場中を走る荷電粒子の運動の式及びイオン電流に関する 連続の式を連立させて解く必要があるため、大形電子計算機 を用いた数値計算を行なう。図3(a)は、このような方法を用 いて求めたイオン軌道計算結果の一例である。同図(b)は、文 献⁴⁾に発表された実験データと比較した結果を示すものである。 文献によれば、加速電極のアパチュアの形状をいろいろと変 化させてイオン発散角を測定しているが、ここで得た計算値 と文献による実測値とはよく一致している。





測定値とを示したものである。完全な二重シールドのシール ド効果が優れていることはいうまでもないが,簡単な構造の 部分的二重シールドでも,比較的良好なシールド効果をもっ ていることが分かる。

5 サージブロックコアの解析

イオン源の引出し電極間で、イオンビーム引出し時にしばし ば放電破壊が発生する。放電破壊が発生すると、直列レギュ レータバルブにより高速に電源をカットオフするが、電源とイ オン源を接続するケーブルやその他の漂遊容量に蓄積された エネルギーは、イオン源に流入する。サージブロックコアは、 この放電破壊時に、イオン源へ流入するサージ電流を抑える ことにより、イオン源及びイオン源電源の各構成機器を保護 するものである。この目的のためのサージブロックコアは高





図4 磁気シールド効果の解析 モデルによる磁気シールドの効果を実験と計算機により解析し、計算による解析が有効であることを示す。

4 磁気シールドの計算値と実測値

NBIは核融合実験装置本体の近傍に設置されるため、本体から発生する磁場がNBIを貫通する。この磁場により、 イオン源本体及び出力ビーム中の荷電粒子がJ×Bの力で曲 げられ、核融合実験装置への十分なビームエネルギーの注入 が困難になる。したがって、荷電粒子のビームラインを構成 しているイオン源、中性化セル、ビームダンプなどを高透磁 率材料で囲い、磁束をそこで捕捉し、内部に入らないように する。このように厳重な磁気シールドが必要となる。

磁気シールドには、一般に高透磁率材料であるパーマロイ、 純鉄、低ケイ素鋼板などが使われるが、材料が高価なことに 加え高度の製作技術が要求されるため、あらかじめ十分な磁 場の予測をすることにより、合理的な設計を行なう必要がある。

磁場を予測する手法として,有限要素法によって2次元及 び軸対称磁場を解析する手法と,積分方程式を解くことによ る3次元磁場解析の手法が開発されている。前者は磁場分布 の詳細な解析に,後者は3次元構造磁気シールドの定性的な 把握にそれぞれ使用されている。 図4は,中性化セル及びイオン源の磁気シールドのスケー ルモデルの断面の励磁用モデルコイルを考慮した解析結果と

スパイク電流 時間(2μs/div) (c2) パーマロイコア(板厚50μ, 0.0042V·s)

図5 フェライトコアの特性 (a)サージブロックコアモデルの計算機 によるうず電流分布解析結果,(b)サージブロックコアモデルの計算機による周 波数特性計算値,(c)実物サージブロックコアによる放電破壊時の電圧,電流の 実験結果を示す。

378 日立評論 VOL. 62 No. 5(1980-5)

透磁率材料のリング状のもので、イオン源電源とイオン源の 間に挿入され、電源の各出力線はこのコアを貫通してイオン 源に接続される。この貫通導体にサージ電流が流れると、コ ア内にうず電流が流れエネルギーを消費するが、うず電流は コア材質の透磁率、固有抵抗やコア形状、また周波数によっ て変化する。サージブロックコアは、何個かのコアを積み重 ねて構成することより、コア間の漂遊容量を考えると、等価 回路はLRC(リアクタ、抵抗、キャパシタ)の並列回路と考 えられ、コアに要求される主な性能は下記のものがある。

(1) サージ電流を抑えるため透磁率が高いこと。

(2) コアの等価抵抗は、高周波領域で一定以上の値をもっていること(高すぎる場合は外付抵抗を付ける)。

(3) 放電破壊時に、コアに加わる電圧によってコアが飽和しないような断面をもっていること。

(4) コア間は漂遊容量を小さくし,耐圧をもたせること。 コア材質はパーマロイやフェライトが用いられているが,パ ーマロイは透磁率,飽和磁束密度は高いが,高周波領域での 等価抵抗が低く,サージブロックコアとしてはフェライトが 優れている。図5(a)と(b)にフェライトコアのうず電流分布と 等価抵抗の周波数特性を,(c)に放電破壊時のサージ電流波形 とサージブロックコアの分担電圧波形をそれぞれ示す。

6 真空排気系の過渡的シミュレーション解析



NBIのビームライン内のガスの流れは、ビーム入射時に 急激にしかも複雑に変化する。イオン源へのガス導入はパル ス状であり、NBIにつながる核融合実験装置本体の真空度 も急激に変化する。また、イオンの中性化効率は中性化セル 内の真空度で決まり、中性粒子の再電離損失はビームライン 内の真空度で決まる。そこで、ビームライン各部の真空度の 過渡的変化をシミュレーション計算するコードが米国で2種 開発されている^{5),6)}。日立製作所は、パイプ内の真空度分布を 仮想の網目を組んで計算するという新手法を考え出し、真空 度計算の精度を向上し、更に、前記中性化効率と再電離損失 とを含めた全入射効率の時間的変化も求められる計算コード を開発した⁷⁾。図6に計算結果の一例を示す。

7 イオン源用電源の解析

7.1 加速電源の制御特性解析

イオン源電源は、通常加速電源、減速電源、アーク電源、 フィラメント電源などから構成されている。イオン源電源は、 パルス的に電流が流れるいわゆるパルス運転をする。パルス運 転は短時間に大きな電源が必要となるため、短時間に大電流 を流し得るフライホイール付発電機、系統などがイオン源電 源に用いられる。NBIの運転モードは多種多様にわたるた め、各イオン源電源は、供給電力に対して十分な運転が可能 でなければならない。特に、加速電源はイオン源にかかる電 力のほとんどを消費するので、技術的に難しい問題がある。

加速電源の回路構成の一例として、京都大学納め「ヘリオト ロンE」用NBI加速電源の回路構成を図7(a)に示す。この加 速電源はシリースレギュレータバルブ方式で構成されており、 イオン源の加速電極で放電破壊が生じても、レギュレータチ ューブのコントロールグリッド、スクリーングリッドなどの 電圧を制御することにより、安定した動作を行なうことがで きる。 図7(b)は、負荷が急変した場合の、加速電源の制御特性を 解析した結果を示す。解析は、日立製作所の解析プログラム DDS(Digital Dynamic Simulation)を用いて行なった。同図で、 図 6 N B I 内の真空度の経時変化計算 真空排気系の過渡的シミュ レーションの計算機による計算結果を示す。

時間0から50µsたって負荷変動が生じ,100%変動した後,時間0から350µsたって約75%の負荷変動が段階的に生じたと仮定した場合,加速電源の電極端子間の電圧変動は,図示のような結果が得られる。75%の負荷変動に対しても,電圧変動は±3%の変動に収まり,制御特性が良好であることが分かる。

本解析は、図7(b)に示す直流電源と負荷(イオン源)の間に 設けたレギュレータチューブのコントロールグリッド、スク リーングリッドの電圧を制御することにより、電圧変動をで きるかぎり小さくするように制御した。これによって、主回 路定数、制御系の諸定数を決定できる。

7.2 加速電源のサージ解析

加速電源のイオン源で放電破壊が起こった場合,レギュレ ータチューブの定電流特性により事故電流が抑制でき,事故検 出後,レギュレータチューブを制御することによって事故電 流はしゃ断できる。このとき,電流の急激な変化によって発 生する過電圧を抑制しなければならない。

図7(c)は、イオン源事故時の解析結果の一例を示すもので ある。時間0から250µsたって事故が発生すると、レギュレー タチューブの陽極特性によって電流はある程度抑制できるが、 急激な電流変化に対して、回路の対地漂遊容量、配線のイン ダクタンスなどの影響で振動電流が発生し、各部に過電圧が 発生する。しかし解析では、イオン源とレギュレータチュー ブの間に挿入されたサージブロックコアによって過電圧は抑



制できる。

過電圧によって、更にレギュレータチューブで短絡現象が 起こると、イオン源を通して事故電流が流れイオン源を破損 する心配がある。そこで、図7(a)に示すイグナイトロンを点 弧し事故電流をバイパスさせて、その後で交流側のしゃ断器 によって事故電流をしゃ断する。

7.3 GTO(Gate Turn Off)サイリスタを使ったアーク電源の解析

アーク電源の回路構成の一例として、図7(d)に京都大学納 め「ヘリオトロンE」用の回路構成を示す。アーク電源は、イ オン源内の水素ガス中で放電させて、水素ガスをプラズマ化 するための電源で、放電によるアークの特性をプラズマの生 成に最も有利にするため、定電圧制御が必要である。このよ うな条件に対応できる高信頼度の回路として、GTOサイリ スタを用いた回路構成が適している。GTOサイリスタは、 ゲート電流を制御するだけで素子に流れる電流を短時間に ON/OFFできるので、高速開閉制御が行なわれるアーク電 源に適している。

図7(d)で、負荷と並列にGTOサイリスタのバイパス回路 を接続し、負荷通電前に電源からバイパス回路を通して通電 しておく。負荷通電開始時はGTO1を点孤しGTO2をしゃ断す ると、バイパス回路の電流は負荷に転流する。このとき、負 荷のインピーダンスとバイパス回路のインピーダンスの差が数 十パーセント程度あっても、出力電圧の変動は5%以下に制 御できるので、バイパス回路は有効である。

7.4 発電機制御シミュレーション

NBIイオン源電源を駆動する発電機のシミュレーション は、負荷パターンをもとにして行なう。その方法は本特集号 別論文、「核融合電源制御システム解析とシミュレーション」⁹⁾ に詳細に述べてあるので、ここでは省略する。

18 ビームダンプの熱解析

ビームダンプは冷却管の集合体で構成されており、ここでは、中性化されない粒子がパルス的に入射し、受熱面での熱流束は0.5~1kW/cm2にも達する。そのため、ビームダンプには過大な熱応力の発生が予想される。これを評価するため、ビームダンプ冷却管の非定常温度分布を、冷却水の沸騰を考



図7 加速電源回路及び特性並びにアーク電源回路 (a)は加速電源の回路構成,(b)は加速電源での負荷変動時の制御特性で75%の負荷変動に対しても、制御系の特性が良好で、出力電圧の変動は少ないことを示している。 (c)はイオン源での放電破壊時のレギュレータチューブの過電圧の計算値で、対地漂遊容量の影響により、イオン源の放電破壊が起こると、回路に振動電圧が発生するが、この振動電圧を計算することができることを示している。(d)はアーク電源の回路構成で、スイッチング素子にGTOを使用し、高速制御が可能となった。

図8 ビームダンプ冷却管の温度の変化及び分布 図中のB, CはA-A'断面でのB, C点の温度を示しており, Bは最高温度, Cは最低温度となっている。

380 日立評論 VOL. 62 No. 5 (1980-5)



(a) 液体ヘリウム循環試験装置

(b) 液体ヘリウム循環試験

(c)液体ヘリウム循環試験

液体ヘリウム循環試験 × 9 (a)は液体ヘリウム循環試験装置で、ガラス製で内部の液体ヘリウムが観察できるようになっている。(b)はすべての管に一定 熱負荷を与えた試験で,白く光っているのが気泡,透明部は気体であり,液体ヘリウムの循環が止まったことを示している。(c)1本だけ熱負荷を零にした試験で, 透明部は液体ヘリウムであり、再び液体ヘリウムの循環が始まったことを示す。

慮して解析するプログラムを開発し,設計に適用できるよう にした。図8に、受熱面での熱流束が500W/cm²のときの計算 結果を示す。この例では、温度上昇はビーム入射後約2秒で 定常に達し、このときの最高温度は237℃、最低温度は156℃ となる。

クライオパネル内の液体ヘリウムの観察⁸⁾ 9

ビームラインに設備される高排気速度真空ポンプには、一 般にクライオポンプが採用される。クライオポンプは、低温 に冷却されたクライオパネルにガスを凝結させて排気効果を 得るもので、水素ガスを凝結させるためには、液体ヘリウム 温度(-270℃級)が必要である。ところが、寒剤として使われ る液体ヘリウムの蒸発潜熱は極めて小さく(1Wの入熱で毎時 1.41の液体が気化する。)、しかも、液体ヘリウムの製造には 多大の電力を要する(1Wの冷凍負荷を発生するのに数百ワッ トの入力が必要である)。そのため、クライオポンプには、液 体ヘリウムで冷却されたクライオパネルのほか、周囲からの 輻射熱の侵入を防ぐための液体窒素で冷却されたシールドや シェブロンバッフルが装備される。クライオパネルで侵入熱 や発熱があると、液体ヘリウム流路で気泡が発生、流路を閉 塞(ベーパーロック)し、冷却を阻害するおそれがある。そこ で、図9(a)のような試験装置を使って、液体ヘリウムの流れ の状況を観察した。この装置は、クライオパネル中の液体へ リウム流路(並列管群)をモデル化したもので、上部に液体へ リウムだめを具備し,液体が自然循環によって並列管群に供 当大きな熱負荷を受けているにもかかわらず、液体ヘリウム が循環することが分かる。これを図9(c)に示す。このように, 熱負荷を受けないところが1箇所でもあれば、液体ヘリウム の自然循環は極めて円滑になることを確認した。

言 結 10

NBIの設計,製作に際し,日立製作所で実施した研究成 果の概要を取りまとめ述べた。NBIに関与する現象は複雑 であり、その性能向上がますます要望され、今後とも試験、 研究に努め、高性能で信頼性のあるNBIを製作して行きた いと念願している。本稿をまとめるに当たり、御指導をいた だいた日本原子力研究所,京都大学及び筑波大学の関係各位 対し深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) PLT Group : Proc.7th Inter. Conf. Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Res., Innsbruck, Austria, 1978
- F.H.Coensgen et al.: Proc. 6th Inter. Conf. Plasma Physics 2) and Controlled Nuclear Fusion Res., Berchtesgaden, Germany, 1976
- 日本原子力研究所:核融合研究開発の現状, 1979, p.52 3)
- L.R.Grisham et al. : Rev. Sci.Instrum., Vol.48, No.8, 4) August 1977 5) A.L.Lee, et al. : Proc.6th Symp. on Eng. Problems of Fusion Res. (1975-11) 836 J. Sredniawski: TFTR Report No. EP-090 (1977-11) 6) A. Maekawa, et al : Proc. of Eighth Symp. on Eng. Problems 7) of Fusion Res. (1979-11) to be published. 磯部,外:低温工学研究発表会予稿集,81-11, p.20(1979-6) 8) 藪野,外:核融合電源制御システム解析とシミュレーション, 9) 日立評論, 62, 363~366 (昭55-5)

給される方式を採っている。試験装置は透明なガラス製で,
内部の液体ヘリウムの流動が外から観察できるようになって
いる。ガラス管の中にヒータを配置し、これに負荷を与えた。
図9(b)は過度の負荷をすべての管に一様に与えた場合で、管
内で気化したヘリウムのため,上部液だめからの液体ヘリウ
ムの補給が止まり,完全に液体の存在しないところが見える。
ところが、1本の管だけ熱負荷を取り去ると、ほかの管は相