U.D.C. 621.039.647

最近のプラズマ加熱中性粒子入射の新技術

Current Engineering Aspect of Neutral Beam Injection for Plasma Heating of Nuclear Fusion Reactor

中性粒子入射加熱装置に，次期計画の核融合装置用として今後要求される項目には，高電圧化，大容量化，長パルス化の外に高効率化，長寿命化がある。京都大学ヘリオトロンEや日本原子力研究所JT-60原型ユニット排気系の実績をもとに，これらの要求に対応するため進めている開発の最近の成果について述べる。

従来の大電力真空管の代わりにゲートターンオフサイリスタを用いた，寿命，効率などで有利なイオン源用半導体化加速電源を開発した。また，100万l/s級大容量クライオポンプでの，クライオパネル内液体ヘリウム循環方式を確立し，ガラスモデルと実規模クライオポンプを用いて検証した。イオン源用磁気シールドの単純化構造の磁気特性が，従来構造と同等であることを$\frac{1}{4}$縮小磁気モデルで検証した。

柴田猛順* Takemasa Shibata
柴沼　清** Kiyoshi Shibanuma
荒木政則*** Masanori Araki
佐野史道**** Fumimichi Sano
上出泰生***** Taisei Uede
岡　勇藏***** Yûzô Oka
橋本　勲***** Isao Hashimoto
佐藤　忠****** Tadashi Satô
尾形久直******* Hisanao Ogata

1 緒　言

NBI(中性粒子入射加熱装置)によるプラズマ加熱は，高エネルギーの中性粒子(水素又は重水素)ビームを閉じ込め磁場へ入射し，磁場中のプラズマと衝突させることによってイオン化，熱化の過程を経てプラズマの温度を上昇させ，加熱する方法である。日立製作所では，NBIの開発を進め，京都大学ヘリオトロンE用NBI・日本原子力研究所JT-60用NBI原型ユニット排気系で，実績・成果を挙げてきた[1)~6)]。次期計画の核融合装置用NBIに今後要求される項目として，高電圧化，大容量化，長パルス化とともに，高効率化，長寿命化がある。この要求に対処するため各種の新技術の開発を進めているが，そのうちの幾つかの最近の開発成果について述べる。

NBIは，**図1**に示すようにイオン源，イオン源用電源，ビームライン，液体ヘリウム液体窒素循環設備，補助真空排気系，純水冷却水循環設備などから構成されている。ビームラインは，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，真空排気タンク，磁気シールドなどの総称である。これらの構成要素について個々に開発を進めているが，本稿では，

(1) イオン源用電源として，従来の大電力真空管の代わりに寿命，効率，メンテナンスなどで有利なGTOサイリスタ(ゲートターンオフサイリスタ)を用いた全半導体化加速電源の開発

(2) 信頼性の高い100万l/s級の排気速度をもつクライオポンプとして，クライオパネル内を液体ヘリウムが安定に循環するクライオポンプ構造の開発

(3) 高信頼化，高効率化のためのビームライン要素技術として，磁気シールドと偏向磁石の単純化構造の開発

の結果について述べる。なお，クライオポンプ内液体ヘリウム循環方式の開発は，日本原子力研究所と共同で実施されたものである。また，全半導体化加速電源の開発は，京都大学の指導のもとで実施されたものである。

2 全半導体化加速電源

イオン源用電源は，加速電源，減速電源，アーク電源，フ

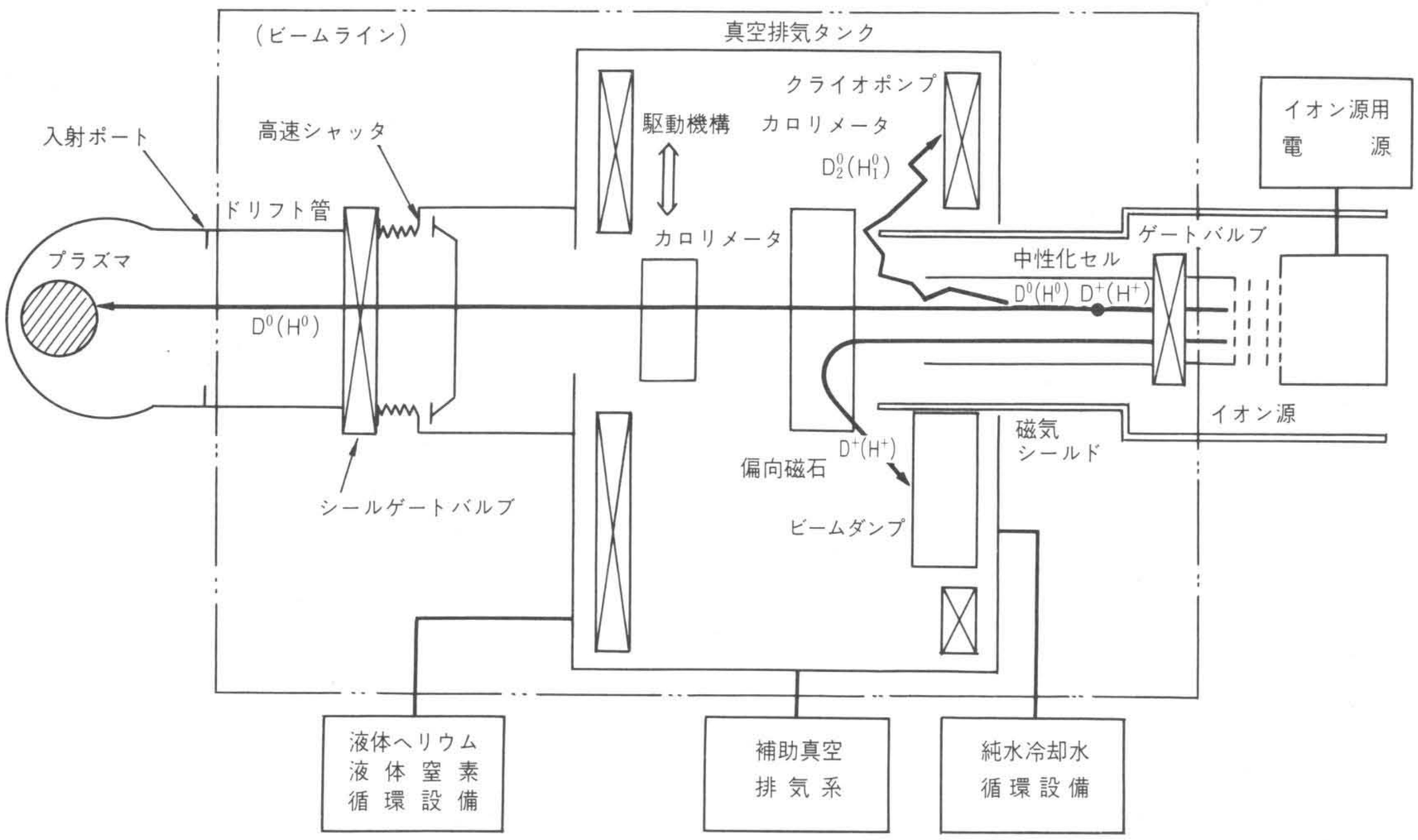


図1　中性粒子入射加熱装置の基本構成　中性粒子入射加熱装置は，イオン源，イオン源用電源，ビームライン，液体ヘリウム液体窒素循環設備，補助真空排気系及び純水冷却水循環設備から構成されている。

* 日本原子力研究所東海研究所核融合研究センター核融合研究部　理学博士　** 日本原子力研究所東海研究所核融合研究センター核融合研究部
*** 日本原子力研究所東海研究所核融合研究センター大型トカマク開発部　**** 京都大学ヘリオトロン核融合研究センター　工学博士
***** 日立製作所国分工場　****** 日立製作所日立研究所　******* 日立製作所機械研究所

ィラメント電源などから構成されている。**図2**にイオン源とイオン源用電源の関係を示す。イオン源用電源の中でも最も大容量のパルス電源である加速電源は，直流電圧（30～120 kV），大電力（数千～数万キロワット），更に高速スイッチング（数十マイクロ秒のオン・オフ）と高速応答性をもつ定電圧制御が要求され，従来，大電力四極真空管が用いられてきた。今後要求されるイオン源の高電圧（120～200kV），大容量化に伴い真空管を使用する場合には，真空管の開発，効率，冷却，X線の発生，信頼性などの問題の解決が必要となる。この対策として今回GTOサイリスタを用いた高速度の高電圧直流スイッチと，GTOサイリスタによる多段スイッチングレギュレータ方式の，高速定電圧制御回路を組み込んだ新回路方式を採用し，従来一部真空管を用いていた半導体化電源を一歩進めた全半導体化加速電源を開発した[7]。

開発した全半導体化電源は，真空管を用いた電源に比べて，下記のような特長がある。

(1) 真空管に比べて寿命，効率，冷却，X線発生，信頼性の点で有利である。

(2) 高電圧化に対しては，ビルディングブロック方式で対処できる。

(3) マスタスレーブ方式によるスイッチング回路を開発したことにより，ゲート回路が極めて少なくなり，信頼性が高い。

(4) 高電圧の直流を数十マイクロ秒という高速度でオン・オフが可能である。

(5) 直流出力数千～数万キロワットのパルス電源でも，高速度の定電圧制御が可能である。

以下，開発した半導体化加速電源の概要を説明する。まず，高速度・高電圧直流スイッチ特性について述べる。GTOサイリスタによる直流スイッチの基本回路を**図3**に示す。高電圧化（数十キロボルト以上）するために数十個のGTOサイリスタを直列接続しているが，ゲート回路は1個である。同図に示すように接続するとGTOサイリスタ不導通時は，常時GTOサイリスタのG～K間に負の電圧が加わり，耐ノイズ性もよい。ターンオン時は，ゲート回路によりGTO_1サイリスタをターンオンさせると，順次GTO_2サイリスタ……，GTO_nサイリスタとターンオンしてゆく。またターンオフ時は，やはりGTO_1サイリスタをターンオフさせると，負荷電流はGTO_2サイリスタのカソードからゲートを通り流れるため，GTO_2サイリスタがターンオフし，順次ターンオフしていく。また，全体のターンオフ時間は，負荷電流が直接ターンオフ電流として働くため極めて短い。高電圧化するときは，**図3**のブロックを電圧に適した個数直列接続することで対応できる。**図4**にターンオン時とターンオフ時の主回路の電流波形を示す。

次に，高速度の多段スイッチングレギュレータ，及び分圧比可変器を組み込んだ高速定電圧装置について述べる。従来，サイリスタなどを用いた電源の定電圧制御は，交流の周期ごとに行なわれるため，周期以上に速くすることはできなかった。**図5**に前述の直流スイッチ，GTOサイリスタによる多段スイッチングレギュレータ及び分圧比可変器を組み込んだ高速定電圧制御可能な直流電源の基本回路を示す。高速定電圧制御は，出力電圧と設定電圧の差に対応し，主回路と直列に接続された十数箇の直流電源のGTOサイリスタをオン，オフ制御させて行なっている。また，イオン源の第2加速電極用電圧の定電圧制御は，高速度で抵抗分圧器の分圧比をGTOサイリスタのオン，オフで可変することにより行なっている。

以上の直流スイッチと定電圧制御の方式の採用により，特長ある全半導体化加速電源とすることが可能となった。減速電源についても，加速電源と同じく半導体化電源とすることができるので，従来から半導体化されているアーク電源とフィラメント電源と合わせて，イオン源用電源を全半導体化することが可能となった。

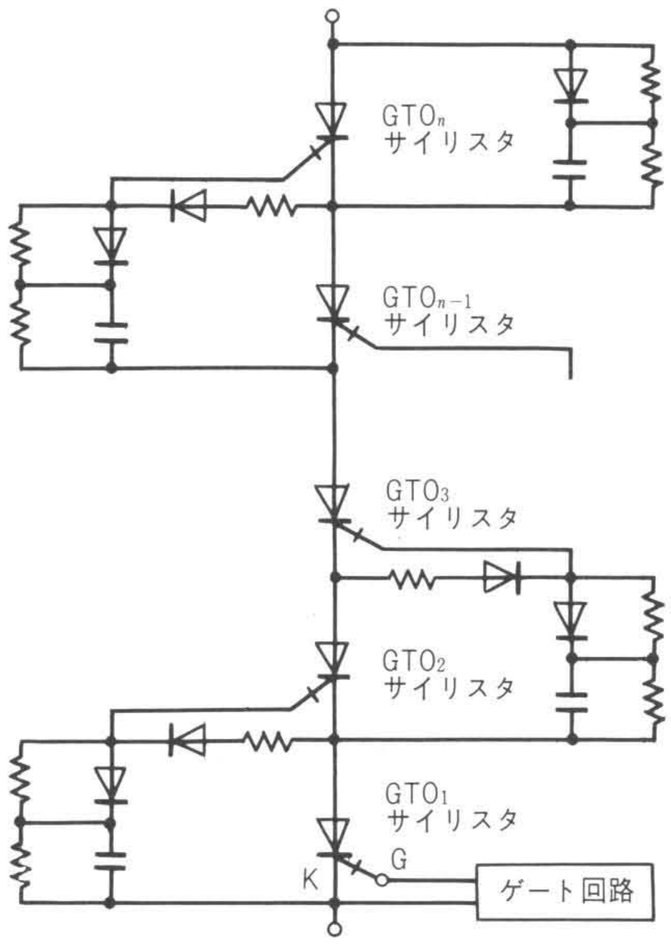


図3 GTOサイリスタを用いた直流スイッチの基本回路 GTO_1サイリスタをゲート回路によりターンオン（又はターンオフ）することにより，順次GTO_2サイリスタ…GTO_nサイリスタをターンオン（又はターンオフ）する。

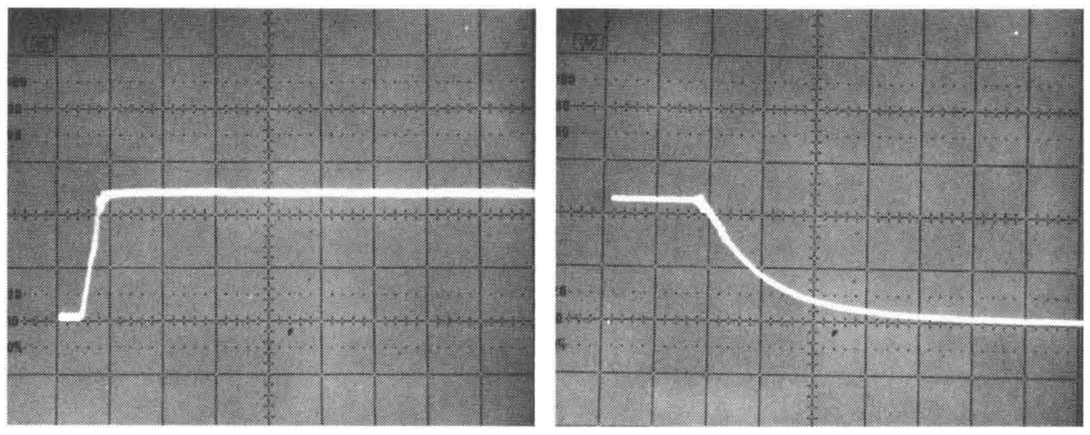


図4 主回路電流波形 直流スイッチをオン・オフしたときの主回路の電流波形（10A/div, 10μs/div）を示す。左側がオン時波形，右側がオフ時波形である。

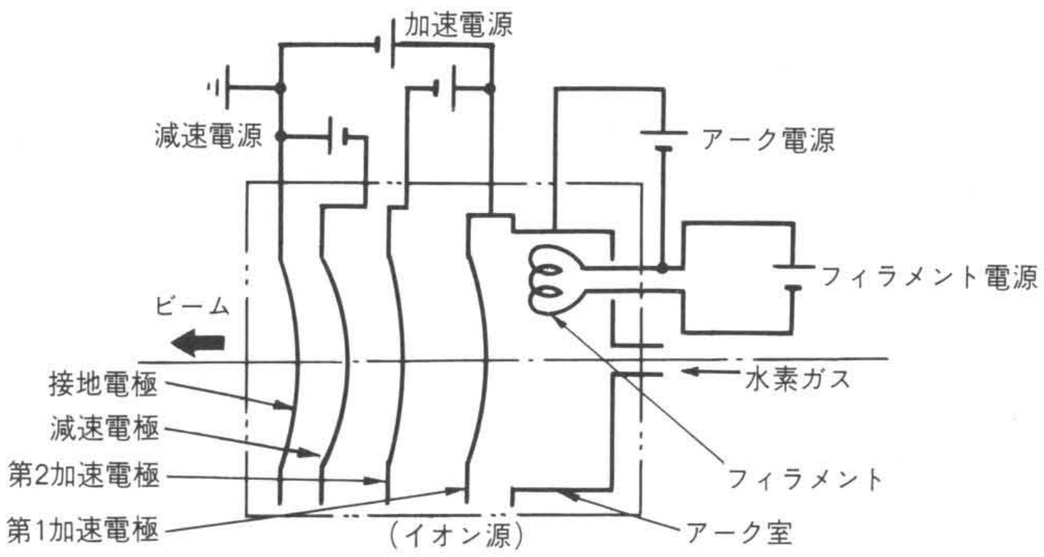
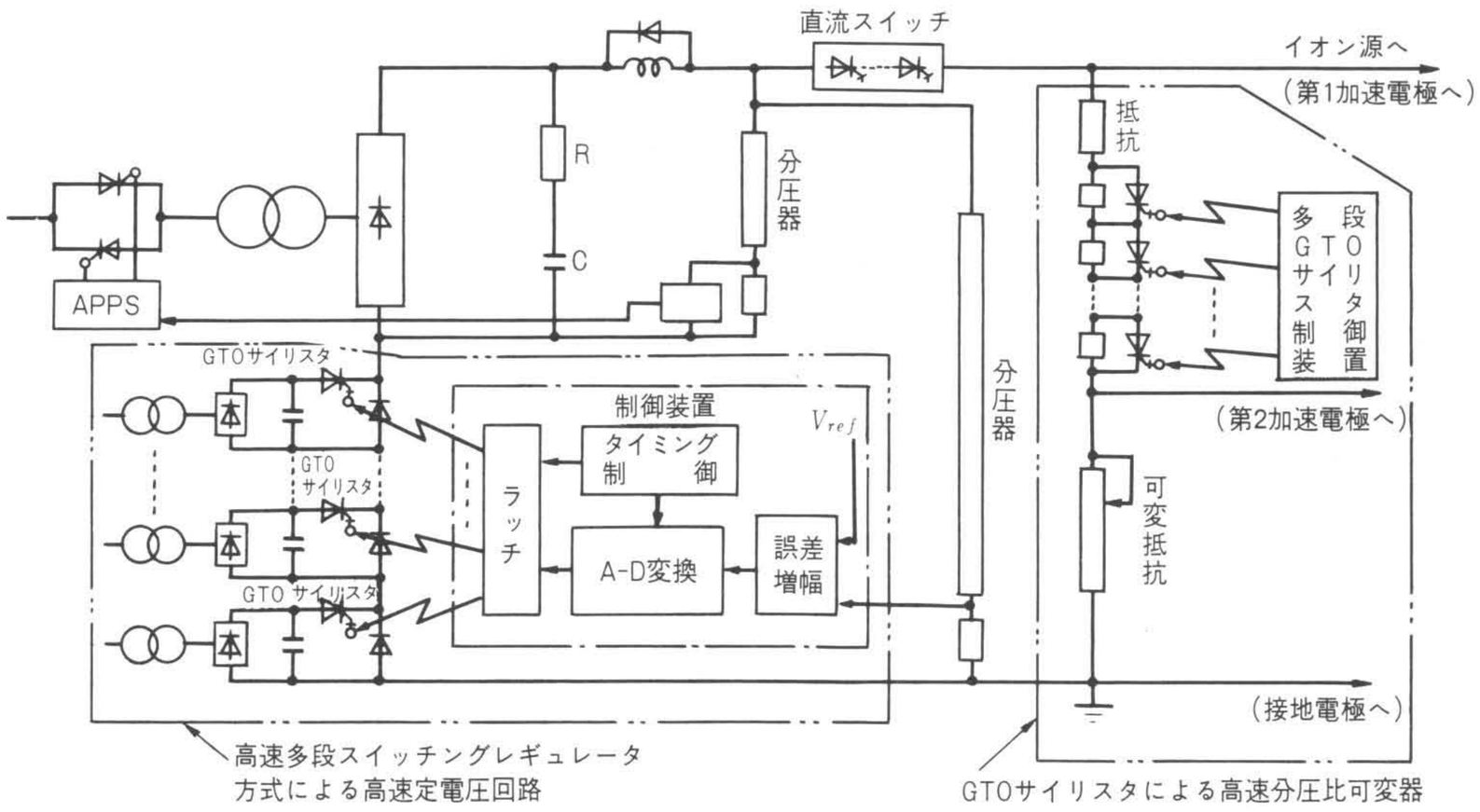


図2 イオン源とイオン源用電源 イオン源用電源は，加速電源，減速電源，アーク電源及びフィラメント電源から構成される。

3 クライオポンプ内液体ヘリウム循環方式

イオン源から引き出され，中性化セルで中性化された高エネルギー粒子が，真空排気タンク内で再電離することを最小限に抑えるために，真空排気タンクの残留水素ガス（又は重水素ガス）を高速排気する必要がある。NBIでは一般に，液体ヘリウム液体窒素循環設備と組み合わせて，液体ヘリウムと液体窒素で冷却されたクライオポンプが用いられており，ヘリオトロンE及びJT-60原型ユニットのNBIで製作実績をもっている。



注：略語説明　APPS(Attached Parallel Packet Processing Subsystem)

図5　加速電源基本回路　加速電源の基本回路は，GTOサイリスタを用いた直流スイッチと高速定電圧制御回路を中心に構成されている。

クライオポンプは，真空排気タンクの側面に沿って取り付けられており，残留水素ガスを表面に凝縮させるクライオパネル，クライオパネルへの周囲からの熱放射を遮へいし，水素ガスを通過させるシェブロンバッフル，熱放射を遮へいする熱シールド，気液分離器などから構成されている。

クライオポンプとヘリウム冷凍機システムは，ヘリウムトランスファラインで結合された閉ループを形成している。ヘリウム冷凍機システムから液体ヘリウムをクライオポンプへ供給し，クライオポンプでガス化したヘリウムは，ヘリウム冷凍機システムへ戻される。液体窒素は，一般的に液体窒素貯槽からクライオポンプへ供給される。この液体ヘリウムと液体窒素の供給量を少なくするために，クライオポンプの熱損失を低減する方策を考える必要があり，このための研究開発が進められている。また，クライオポンプの定常運転時の安定な排気性能を確保することが重要である。ここでは，定常運転時ヘリウム冷凍機システムから供給された液体ヘリウムの，クライオポンプ内での循環方式について述べる。

シェブロンバッフルと熱シールドを液体窒素で冷却すると同時に，クライオパネルを液体ヘリウム温度まで冷却し，クライオパネルと気液分離器に，液体ヘリウムをため込むためのクライオポンプの運転を予冷運転という。クライオパネルと気液分離器に液体ヘリウムがたまり，高速排気が可能な状態を定常運転という。シェブロンバッフルや熱シールドからの輻射熱，クライオパネル支持構造部からの伝導熱などによる熱負荷により，クライオパネル内で液体ヘリウムがガス化する。このガス化した量だけ，液体ヘリウムを気液分離器とクライオパネル内で安定に循環させる方式を確立することは，排気性能上重要な課題である。特に，クライオポンプが大容量化するにつれ，液体ヘリウムのガス化量が増加するため，安定な液体ヘリウムの循環方式を確立することが必要となる。

100万l/s級の排気速度をもつ大容量クライオポンプは[8]，長さ4.5m，幅1m程度のクライオパネル4個を1個の気液分離器に配管で接続される構造となっている。この構造で，安定な液体ヘリウムの循環が得られる配管系統を確立するため，ガラスを使用した可視化モデルを製作した。モデルは，クライオパネルと気液分離器間の配管部を実規模大で製作し，熱負荷としてヒータ入力を変化させて加えた。液体ヘリウムとガスヘリウムの流れが可視化され，流れを観察した結果から，**図6**に示すようなクライオポンプの液体ヘリウム配管系統で，液体ヘリウムの安定な循環が得られることが分かった。すなわち，予冷運転時は予冷弁を開，定常弁を閉として，クライオパネル下部から液体ヘリウムを供給し，定常運転時は予冷弁を閉，定常弁を開とし，気液分離器に液体ヘリウムを入れ，その後クライオパネル下部から供給する方式である。この方式を実規模のクライオポンプで確認実験し，気液分離器内の液体ヘリウム液面が，熱負荷条件に関係なく安定している循環方式であることを検証した。

4　ビームライン要素技術

クライオポンプ以外のビームライン要素についても，点検保守や材料の面で構造を単純化することが，今後のNBIにとって必要である。ここでは一例として，イオン源磁気シールドと偏向磁石について，単純化構造の開発結果[9]について述べる。

イオン源用磁気シールドは，ビーム引出し軸に垂直な成分の磁場を，イオン源部で0.5G（シールドファクタ約200）と極めて小さくしなければならないので，従来，構造は複雑な二重シールドとし，材質として電磁軟鉄やパーマロイと特殊な材料を用いていた。今後の核融合実験炉を考えると，構造を簡略化しイオン源の保守点検を容易にする必要があり，また工業製品として一般工業材料を使用できることが望ましい。

検証試験には，$\frac{1}{4}$縮小の磁気モデル（**図7**）を用いた。磁気モデルは，イオン源用磁気シールド，中性化セル磁気シー

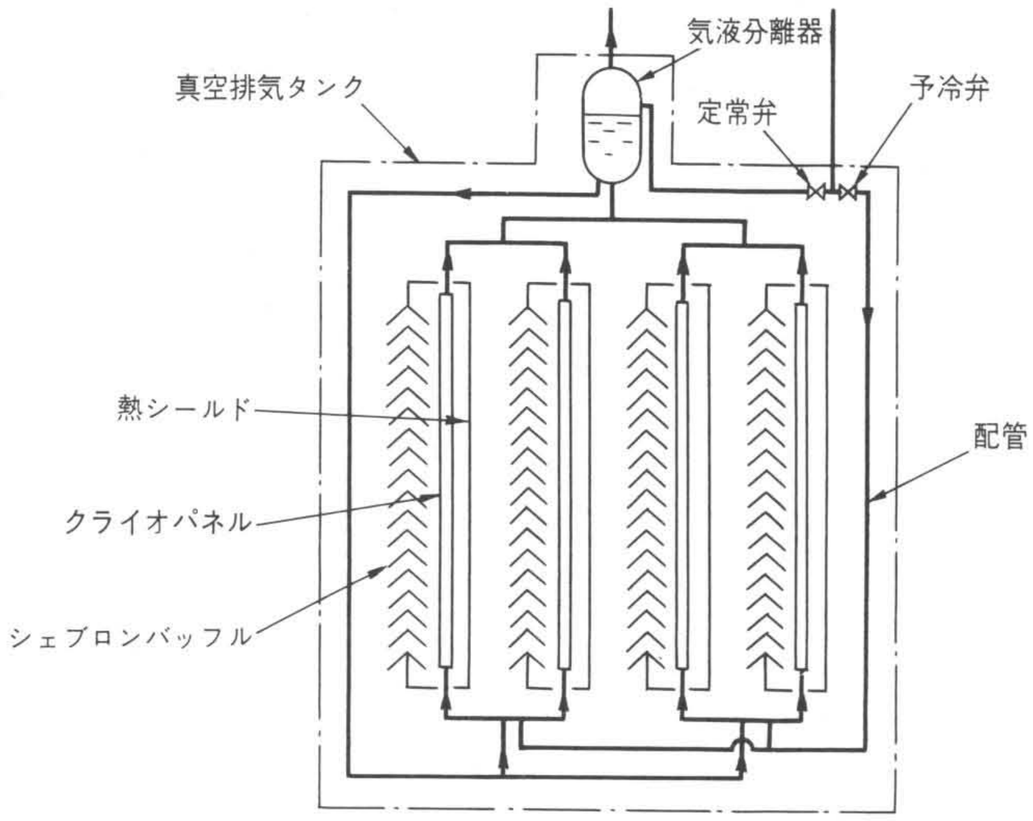


図6　クライオポンプの液体ヘリウム系統図　予冷運転時は予冷弁を開，定常弁を閉とし，定常運転時は予冷弁を閉，定常弁を開として液体ヘリウムを循環させる。

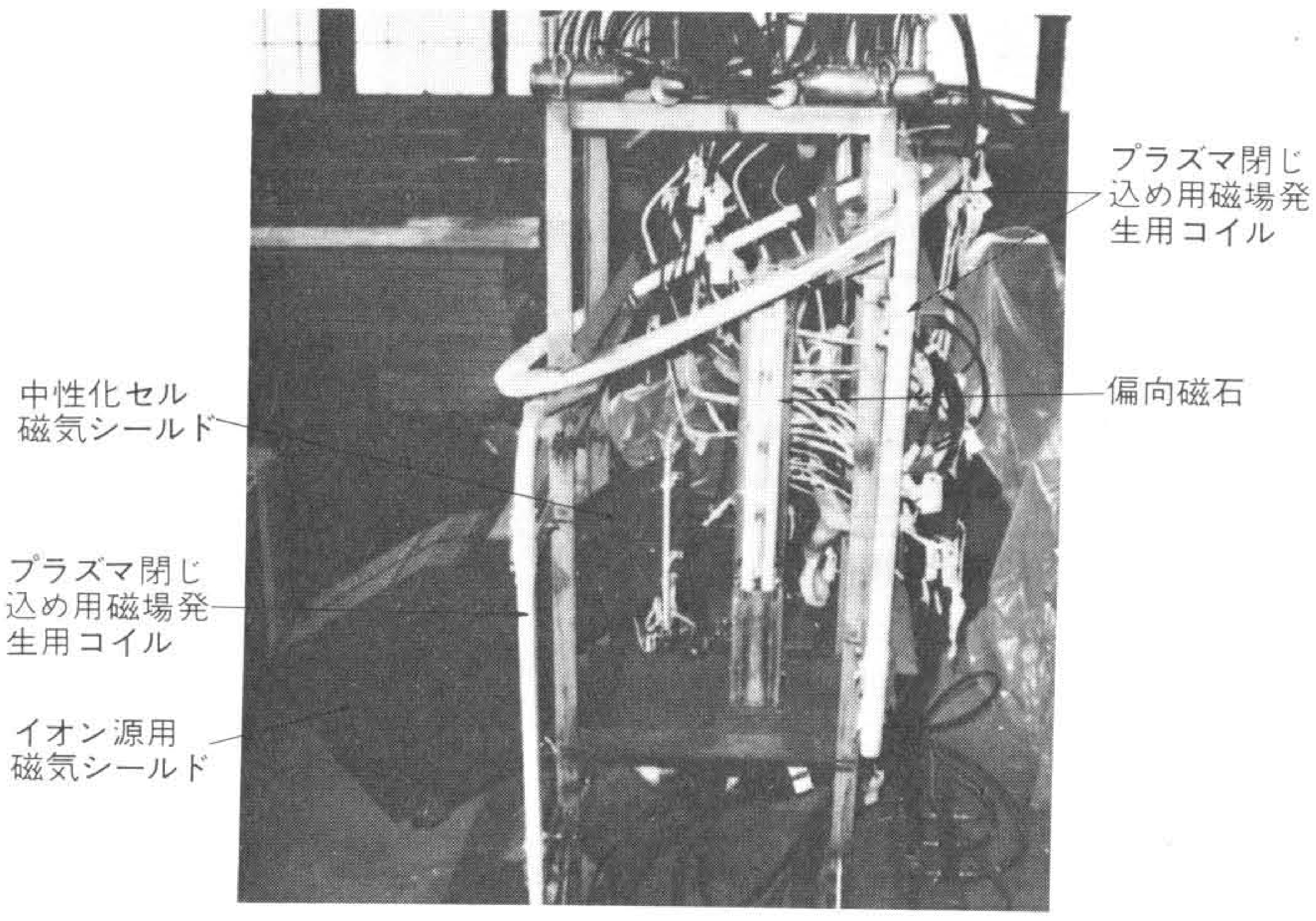


図7 $\frac{1}{4}$縮小磁気モデル　イオン源用磁気シールド，中性化セル磁気シールド，偏向磁石及びプラズマ閉じ込め用磁場発生用コイルから構成されている。

表1 イオン源用磁気シールド構造モデル　従来のイオン源用磁気シールドは，電磁軟鉄とパーマロイを使用した二重シールド構造（モデルⒶ）であったが，合理化構造としてモデルⒷ，Ⓒを検討するため，モデルⒶ，Ⓑ，Ⓒの$\frac{1}{4}$縮小磁気モデルを製作した。

モデル名＼材質・形状	外　層	内　層	特　長
モデルⒶ	電磁軟鉄 外形：2,040×1,920×1,340(mm) 厚さ：15mm	パーマロイ 外形：1,935×1,675×1,100(mm) 厚さ：5mm	二重シールド （従来の構造）
モデルⒷ	鋼材（SS-41） 外形：2,040×1,920×1,340(mm) 厚さ：15mm	パーマロイ 外形：270×1,675×1,100(mm) 厚さ：5mm	内層を簡略化した構造 （中性化セル磁気シールドの延長部に一部取付け）
モデルⒸ	鋼材（SS-41） 外形：2,040×1,920×1,340(mm) 厚さ：15mm	なし	単一シールド

ルド，偏向磁石及びプラズマ閉じ込め用磁場発生用コイルから構成されている。試験したイオン源用磁気シールド構造モデルは，**表1**に示す3種類である。外部磁場は約100Gである。

測定結果の一例を**図8**に示す。イオンビームが磁場から強く影響を受ける部分の代表3点について，各モデルのZ成分磁場の値を同図に示す。アーク室の外部に永久磁石を取り付けるバケット型イオン源では，一般にX成分磁場はイオンビーム引出しにほとんど影響を及ぼさないが，イオン源の放電に影響を及ぼす可能性がある。Y成分磁場はZ成分磁場よりも小さい。モデルⒶとⒷの測定結果から，イオン源用磁気シールドは，中性化セル磁気シールドの延長に一部内層を設けることにより，ビーム軸と垂直な成分について，二重シールドとほぼ同等の性能を発揮することが分かった。更に，モデルⒶとⒷで外層の材料を変えた測定結果から，外層の材料として鋼材を用いても，電磁軟鉄とほぼ同等の性能を発揮できることが分かった。

偏向磁石には，従来電磁軟鉄を使用しているが，同モデルで材料として焼鈍した鋼材（SS-41）を使用して，詳細な磁場分布を測定した。その結果，設計段階から鋼材を用いた場合の磁場分布を考慮すれば，電磁軟鉄の代わりに鋼材が使用可能であることが分かった。

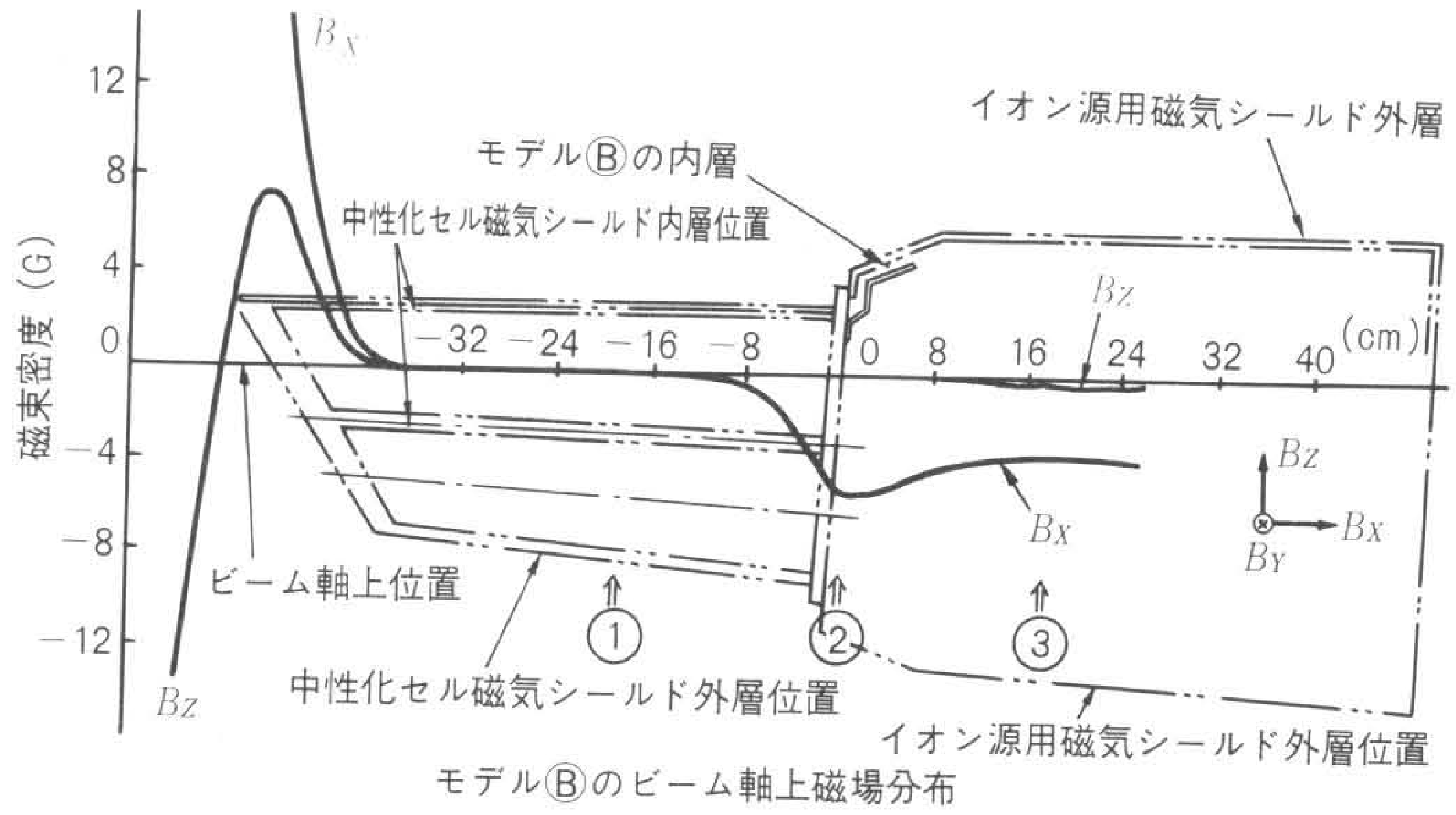
ビームラインの要素試作として，この外に絶縁物シールの真空シール特性・ヒートサイクルによる機械的強度・アウトガス特性や，低温ガスケットの真空シール特性などの検証試験も実施している。

5 結　言

今後，次期計画の核融合装置用NBIに適用できる新技術として，イオン源用加速電源，クライオポンプ，イオン源用磁気シールドなどに関する新技術を開発した。

今後，負イオン源やエネルギー回収装置などの開発をもとに，NBIの高効率化を進める必要がある。同時に，負イオン源やエネルギー回収装置を組み込んだ従来とは異なるNBIシステム全体について開発してゆくことが必要であり，これらの開発に今後努力してゆく考えである。

終わりに，クライオポンプ及びイオン源用磁気シールドの開発の遂行に当たり，種々御指導をいただいた日本原子力研究所・核融合研究センター・加熱工学第1研究室室長・松田慎三郎工学博士をはじめ，同研究室の各位，また，半導体化電源の開発に当たり種々御指導をいただいた京都大学ヘリオトロン核融合研究センター教授・宇尾光治工学博士及び大引得弘工学博士をはじめ同センターの諸先生に対し，謝意を表わす次第である。



モデルⒶ，Ⓑ，Ⓒのビーム軸上Z成分磁場

モデル＼ビーム軸上部位＼項目	単位(G) Z成分磁場B_Z（シールドファクタ）		
	①（X＝−26cm）	②（X＝0cm）	③（X＝18cm）
Ⓐ	0.2(500)	0.2(500)	0.2(500)
Ⓑ	0.3(330)	0.2(500)	0.2(500)
Ⓒ	0.6(170)	0.9(110)	0.2(500)

図8 磁気モデルの測定結果　グラフはモデルⒷについて，ビーム軸上の磁場分布を示す。付表は，モデルⒶ，Ⓑ，Ⓒについてビーム軸上の点①，②，③でのZ成分磁場を示す。図は，磁気モデルの側面から見た断面図である。

参考文献

1) 宇尾，外：核融合装置「ヘリオトロンE」用中性粒子入射装置の技術開発，日立評論，**64**，2，35～40(昭57-2)
2) N. Hosomi, et al.：Cryogenic System for Heliotron E NBI, Proceedings of IGEC 9 (Kobe, Japan, 11～14 May 1982) pp. 251～254
3) S. Isobe, et al.：Black Coating Materials for Chevron Baffles of Cryogenic Pumping Panels：Proceedings of the 8th Symp. on Eng. Prob. of Fusion Res. (San Francisco, 13～16 Nov. 1979) pp. 533～536
4) M. Kuriyama, et al.：Construction of Prototype Injector Unit for JT-60, 9th Symp. on Eng. Prob. of Fusion Res., Chicago, Oct. 1981
5) S. Matsuda, et al.：Extraction of 75keV, 70A, 10sec Ion Beam at the Prototype Injection Unit for JT-60, 12th Symp. on Fusion Tech., Jülich, Sept. 13～17(1982)
6) 白形，岡，外：臨界プラズマ試験装置"JT-60"中性粒子入射加熱装置排気系の製作，日立評論，**66**，9，655～658(昭59-9)
7) 橋本，外：半導体素子による中性粒子入射装置用加速電源の開発，昭和58年電気学会全国大会50(昭和58-4)
8) T. Shibata, et al.：Cryopumps and Cryogenic Systems of Prototype Injector Unit for JT-60, Proceedings of IGEC 9 (Kobe, Japan, 11～14 May 1982) pp. 612～615
9) 石川，外：NBIイオン源用磁気シールドに関する実験，昭和59年電気学会全国大会53(昭和59-3)