



JAEA-Technology

2007-025



JP0750168

## JT-60SA における NBI 加熱装置の ビームライン予備設計

Preliminary Design of Beamline Components for JT-60SA NBI Heating System

藻垣 和彦 梶澤 稔 小又 将夫 河合 視己人  
池田 佳隆 大槻 信一\* 佐藤 藤男\*

Kazuhiko MOGAKI, Minoru KAZAWA, Masao KOMATA, Mikito KAWAI  
Yoshitaka IKEDA, Shinichi OHTSUKI\* and Fujio SATOU\*

核融合研究開発部門  
粒子ビーム加熱システム開発グループ

NBI Heating Group  
Fusion Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

JT-60SA における NBI 加熱装置のビームライン予備設計

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

トカマクシステム技術開発ユニット

藻垣 和彦・桝澤 稔・小又 将夫・河合 視己人

池田 佳隆・大槻 信一<sup>\*1</sup>・佐藤 藤男<sup>\*2</sup>

(2007 年 1 月 26 日受理)

JT-60SA 用 NBI (Neutral Beam Injection) 加熱装置のビームラインの予備検討として、P-NBI (Positive ion-based NBI) と JT-60SA クライオスタットの取合い検討、NBI 機器の磁気シールドの追加検討、N-NBI (Negative ion-based NBI) ビームライン水平入射位置の下げ変更検討及び既存 NBI 機器の解体検討を 3 次元 CAD を用いて行った。

JT-60SA では真空容器と NBI 機器との間にクライオスタットが入るため、NBI ドリフト部を短くする必要があるが、高速シャッタの撤去及び FRP 材の変換フランジの新規製作により、ドリフト全長を JT-60SA の要求に合せることが可能であることを示した。JT-60SA での漏洩磁場対策に対しては、機器の位置的な干渉調査から、磁気飽和を回避できる厚み 30 mm の磁気シールド板を中性化セル外装周りに追加可能なことを明らかとした。N-NBI ビームラインの水平位置変更 (600 mm 下げ) に関しては、イオン源タンクのベース変更、カロリメータの上部移設、中性化セル部支持柱の新規製作で可能との見通しを得た。さらに既存 NBI 設備の撤去に関して、作業を効率的に行うための最小限の解体範囲及び解体手順を明らかとした。

---

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

\*1 日本アドバンストテクノロジー株式会社

\*2 J P ハイテック株式会社

Preliminary Design of Beamline Components for JT-60SA NBI Heating System

Kazuhiko MOGAKI, Minoru KAZAWA, Masao KOMATA, Mikito KAWAI,  
Yoshitaka IKEDA, Shinichi OHTSUKI<sup>\*1</sup> and Fujio SATOU<sup>\*2</sup>

Division of Tokamak System Technology  
Fusion Research and Development Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received January 26, 2007)

The modification of the beamline components for JT-60SA NBI heating system has been preliminarily studied by means of three-dimensional Computer Aided Design (CAD) technique, such as the connection between positive ion-based NBI (P-NBI) port and the cryostat of JT-60SA vacuum vessel, an additional magnetic shielding plate, the downward-shift of the negative ion-based NBI (N-NBI), and disassembly of the present NBI system. The shortening of drift ducts is needed for JT-60SA because the cryostat is installed between the JT-60SA vacuum vessel and the P-NBI beamline. We have found that the removal of the fast shutter and a newly designed connection flange made of FRP satisfy the requirement for the design of new drift duct. The design study with the 3D CAD indicates that the available space between the neutralizer cell and the ion tank is estimated to be 30 mm, which is enough space to install a thick mild steel in order to avoid the magnetic saturation. On the N-NBI, the downward-shift of 0.6 m required for JT-60SA can be realized by shorting the basement of ion tank, reversing the shaft of the movable calorimeter and exchanging the support structure of the neutralizer cell. Moreover, the minimum removal components and the disassembly procedure have been proposed to disassemble effectively the present NBI system.

Keywords : JT-60U , JT-60SA, NBI , Beamline Components, Disassembly Procedure of NBI, Magnetic Shield

---

\*<sup>1</sup> Nippon Advanced Technology Co., LTD

\*<sup>2</sup> JP HYTec Co., LTD

## 目 次

1.はじめに	1
2. JT-60SA NBI 加熱装置の目標性能	1
3. 機器及び部品の改造	2
3.1 P-NBI ポートとクライオスタットとの取合	2
3.2 磁気シールド	3
3.3 N-NBI 位置下方変更	3
4. 現行設備の解体	6
4.1 解体・撤去範囲	6
4.2 解体手順	7
5. まとめと今後の進め方	8
5.1 まとめ	8
5.2 今後の進め方	8
謝辞	8
参考文献	9
図表リスト	10

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Specification of JT-60SA NBI System .....	1
3. Modification of Components and Parts .....	2
3.1 Connection between P-NBI Port and Cryostat .....	2
3.2 Magnet Shielding .....	3
3.3 Downward-shift of N-NBI .....	3
4. Disassembly of Present System .....	6
4.1 Removal Components .....	6
4.2 Disassembly Procedure .....	7
5. Summary and Future Work .....	8
5.1 Summary .....	8
5.2 Future Work .....	8
Acknowledgments .....	8
References .....	9
Figure and Table List .....	10

## 1. はじめに

JT-60U を超伝導化改修する JT-60SA (JT-60 Super Advanced) 計画が日本と欧州の 2 極により進められている。この JT-60SA は、ITER のサテライトトカマクとして ITER と同じプラズマ形状で高加熱実験を行い ITER に対して科学的知見を提供するとともに、原型炉に必要な高出力密度連続運転法の開発を行うものである [1]。JT-60SA では、ITER と同じような D 型プラズマ形状を得るために大型真空容器が導入されるとともに、トロイダルコイル、ポロイダルコイルの超伝導化のために、真空容器と超伝導コイル全体をクライオスタッフで真空熱絶縁する必要がある。このため NBI 加熱装置としては、クライオスタッフを介してトカマク本に接続する構造が求められる。また JT-60SA では、負磁気シア配位の定常化が重要な研究課題であり、このため現行の負イオン NBI 加熱装置（以下 N-NBI とする）の水平入射位置を約 0.6 m 下げて N-NBI による周辺電流駆動を行う予定である。一方、JT-60SA ではポロイダルコイルをトロイダルコイルの外側に配置する構造となっており、このためトカマク本体から NBI 加熱装置への漏洩磁場は大幅に増加する。漏洩磁場の増大は中性化セルやビームダンプでのイオンビーム軌道を偏向させるため、現行の磁気遮蔽構造に加え新たに磁気遮蔽材の追加が必要である。このように JT-60SA に向けて NBI 加熱装置のビームラインは、多くの改造が必要となる。本技術報告書は、これらの NBI 加熱装置の取合位置、条件に伴う改造及びそれに先立つ現行設備の解体方法の合理化を目的として、ビームライン機器に関する 3 次元 CAD を用いた予備検討をまとめたものである。次章に JT-60SA の NBI 加熱装置の目標性能を述べる。3 章では現行の NBI 加熱装置を JT-60SA に再据付するための改造機器及び部品を明らかにする。4 章では改造を前提とした場合の現行設備の解体・撤去範囲及び解体手順を示す。5 章は本検討のまとめと今後の進め方を述べる。

## 2. JT-60SA NBI 加熱装置の目標性能

JT-60SA では、ITER へ科学的知見を提供するため、高密度高加熱プラズマの長時間（100 秒）実験が要求されている。特に、ITER では核燃焼による 3.5 MeV の  $\alpha$  粒子が主に電子を加熱することから、ITER の実験シミュレーションには 500 keV の高速中性粒子ビームを入射し、電子系を加熱する負イオン NBI 加熱装置の役割は大きい。また最近の実験結果から、NBI によるプラズマ回転制御はプラズマ性能の向上に強く影響することが明らかとなってきており、JT-60SA においてもプラズマ電流の順方向と逆方向の 2 種類の接線 NBI 加熱装置が必要と考えられている。一方、JT-60SA 計画では、既存設備を最大限に有効利用し合理的な改造設計を行う必要がある。これらの考えに基づき、JT-60SA での NBI 加熱装置は、1) 基本的な配置は JT-60U と同じとする（N-NBI の水平位置は変更）、2) 正イオン NBI 加熱装置（以下 P-NBI とする）の入射パワーは 30 秒入射の実績のある 2 MW/ユニットとする、3) N-NBI の入射パワーは JT-60U での目標性能である 10 MW とし、全体として、P-NBI: 2 MW  $\times$  12 = 24 MW、N-NBI: 10 MW、合計 34 MW、100 秒の強力なプラズマ加熱を目指す [2]。図 1 に現行（JT-60U）と JT-60SA での NBI 加熱装置の配置図を示す。また表 1 に基本性能を示す。

### 3. 機器及び部品の改造

JT-60SA の改造計画では、JT-60U 本体及び付帯設備の殆どを撤去し、EU との合同で超伝導コイルや真空容器、クライオスタット等を新規に設計・製作し本体室に据付ける。NBI 装置については 12 基の P-NBI と 1 基の N-NBI を再利用するが、JT-60U 本体の解体に伴いビームライン機器も解体・改造を経て再据付作業を行う必要がある。この作業に伴い (1) NBI 装置と JT-60SA クライオスタットとのポート取合い部構造検討、(2) 100 秒入射化による NBI ポート内のビームリミタの熱容量増加、JT-60SA 化で増大する本体からの漏洩磁場に対する磁気遮蔽の強化、(3) 周辺電流駆動を実施するための N-NBI ビームラインの位置下方変更が改造項目として上がっている。これらの項目に対し、3 次元 CAD [Solid Works] を用いて各機器配置の干渉確認や機器の形状変更の検討を行なった。以下に各項目の問題点と検討結果を示す。

#### 3. 1 P-NBI ポートとクライオスタットとの取合

JT-60SA 本体の装置外形は JT-60U に比べて、クライオスタット構造体が新設される分、大きい(図 2、3)。そのため JT-60SA の NBI ポートと NBI ドリフト部間の距離が JT-60U の 667 mm に対して 523 mm と大幅に短くなっている。一方の P-NBI ドリフト部には、ビーム軸を検出する光プロファイルモニタ、JT-60U 本体側から P-NBI 主排気タンク側へのガス流入を防止する高速シャッタ、JT-60U 本体との電気絶縁を行う絶縁セラミック、ポート変位を吸収する接続ベローズ、そして JT-60U 本体との真空を仕切る大口径ゲート弁等から構成されている。短くなった JT-60SA の NBI ドリフト部に、これら構成機器を設置するための検討を行った。検討に当っては、本体真空容器、トロイダルコイル、NBI ポート周りに一番影響があるトロイダルコイルの EF1 コイル、クライオスタット、P-NBI ドリフト部内機器の形状及び寸法を基に 3 次元 CAD を用いて実施した。

高速シャッタ(全長 224 mm)は TDC (Talor Discharge Cleaning) 等の時に、JT-60U 本体側から P-NBI 主排気タンク側にガスが流入するのを防止するためのものである。平成 8 年に実施した P-NBI ビームラインの接線化(T-NBI) 改造では、大口径ゲート弁を改造してアンシール機構(弁板を完全にシール面に押し付けずに途中で止めが出来るようにした機構) [3]を持たせることで高速シャッタを撤去し、それ以降、安定に T-NBI が運転できていることから、JT-60SAにおいても高速シャッタを撤去することで、ドリフト部全長を 523 mm 以下にできる。ただし高速シャッタを撤去する場合、大口径ゲート弁と主排気タンクとの取合いを改造する必要がある(図 4)。すなわち高速シャッタは主排気タンク内の真空側からボルト止めする構造(すなわち 0 リング溝はボルト位置より外径側)のため、大口径ゲート弁を主排気タンクに取り付けるためには変換フランジを介して接続する(図 5)。変換フランジ長は 80 mm 以下にする必要があり、大口径ゲート弁側フランジ面は 0 リング溝がボルト位置より内径側、主排気タンク側フランジ面は 0 リング溝がボルト位置より外径側とすることで、大口径ゲート弁を主排気タンクに取り付けることが可能である。なお NBI 機器と JT-60SA 本体間には電気絶縁をとる必要があるが、この変換フランジを FRP (Fiber Reinforced Plastics) とすることで、絶縁機能を同時に持たすことが可能である。この結果、大口径ゲート弁のサポート金具が要らなくなりドリフト部のスマート化になりアクセ

スが容易になる。大口径ゲート弁の JT-60SA 側には、接続ベローズを再利用できるように長さ調整用単管を挿入する（図 6）。以上の考案により全長 523 mm 以下の制限を満足しつつドリフト部に要求される機能を確保する方法が確立できた。ドリフト排気カバーに変換フランジを接続する手順や方法についても、3 次元 CAD を用いて P-NBI 主排気タンク内での接続作業が可能であることも検討できた。クライオスタッフとの最終接続部は現在まだ未検討ではあるが、NBI 側接続ベローズに合わせてクライオスタッフ側を製作することで接続可能と考えている。

### 3. 2 磁気シールド

JT-60SA ではトカマク本体からの漏洩磁場は JT-60U と比較して約 2~3 倍程度に増加することが見込まれている。漏洩磁場の増大は中性化セルやビームダンプでのイオンビーム軌道を偏向させるため、これらの機器を溶融する恐れがある。磁場計算コードを使用して JT-60SA 本体からの漏洩磁場によるビームライン機器内の残留磁場を計算した結果、現状の NBI ビームライン機器の磁気シールド及び残留磁場打消システムではこの増加した漏洩磁場に対応出来ないことが判明した [2]。特に現行の中性化セルの磁気シールド材は磁気飽和を起こすことから、この部分をさらに 20 mm 以上の厚さの電磁軟鉄で囲う必要がある。このため磁気シールド予備設計検討として、3 次元 CAD に P-NBI 主排気タンク内臓機器をデータ入力（図 7, 8, 9, 10）して磁気シールドの厚さや他の内臓機器との干渉が無いかの検討を行った。最初に中性化セル外装と主排気タンク内部との干渉箇所を確認（図 11）した結果、一番接近している部分で約 31 mm であり、電磁軟鉄の挿入が可能である事が分かった。しかし中性化セル外装に設置されている第 2 打消しコイル（図 12）及び電源用配管とは距離が無いため、磁気シールド追加はこれらの干渉部分を避けて取り付ける必要がある。その他の干渉を確認する機器として、中性化セル冷却配管とビームスクレイパ（図 13）が上げられるが 50 mm 以上の距離がある事が 3 次元 CAD で確認できた。一方、中性化セルに新規の磁気シールド材を装着するためには、NBI 主排気タンクから中性化セル本体を一度引き抜く必要がある（図 14）。そのため機器の分解・主排気タンクの引き抜き方法や磁気シールド強化作業後の再組立手順の検討も必要であり、今後、ビームライン内臓機器と強化部分の干渉を 3 次元 CAD により検討する予定である。なお磁気シールドの強化方法として P-NBI 主排気タンク外周（大気側）に電磁軟鉄を配置することも考えられる。この場合、中性化セルの引き抜き作業が不要の可能性があるものの、磁気シールド材の厚さを約 50 mm 以上にする必要がある。3 次元 CAD を用いて JT-60SA のクライオスタッフと P-NBI 主排気タンク間で最短距離を調べた結果、タンク下スカートとの取合いフランジ位置で約 180 mm と判明した（図 15, 16, 17）。最終的な磁気シールド強化方法に関しては、今後の詳細な磁場計算結果を待つ必要があるが、今回の 3 次元 CAD を用いた干渉検討により、その設計条件（挿入可能な磁気シールド材の厚み）を明らかにすることことができた。

### 3. 3 N-NBI 位置下方変更

JT-60SA では N-NBI ビームラインを、現行より約 600 mm 下げ、N-NBI による周辺電流駆動実験

を行う予定である（図 18）。このため大規模な改造をせずにビームラインを下げる方法の検討を行ってきた。検討方針として新規製作部品を少なく（コスト減）、JT-60 本体室及び組立室の床の掘削は行わない、放射化の問題から既存設備の加工業は最小で実施出来る範囲とした。N-NBI ビームラインは大きく分けて 4 つから構成されている。JT-60U 本体側からイオンダンプタンク、中性化セル、イオン源タンク、メンテナンスステージである。これらの構成機器の中でビームライン位置下方変更時の影響が大きいのはイオン源タンクである。検討した結果、イオン源タンクベースを新規製作することで、最大約 600 mm 下げられるとの結論を得た。この結果を基に、他の機器に関しても 600 mm 位置変更方法や干渉等を検討した。以下に各構成機器での検討結果を示す。

### 1) イオン源タンク

イオン源タンク（図 19）は、ビームリミタ等の受熱機器とクライオポンプが内蔵されているイオン源タンク本体、イオン源タンクの底面と高さを合わせるためのタンクスカート、全タンクの重量を支えるタンクベースから構成されている。イオン源タンクスカートの全長 4900 mm は検討対象機器内で最長である。長さの変更加工に関して、放射化の理由から持ち出し加工は不可、現地での切断・フランジの再溶接では精度がでないことから不可と判断した。新規製作はコスト的な観点で却下とした。このため位置下げ変更にはタンクベース（図 20）を改造して、どの程度まで下げることが出来るかが鍵となった。イオン源タンクベースを改造する場合、タンクベース単体では全長 588 mm、土台となるグラウト部が 42 mm あり合計 630 mm 内が変更可能な値であることが図面及び現地調査から分かった。初期の検討では、この 630 mm を下げた状態で、既設のタンク受けフランジを介してイオン源タンクを据付ける案を進めたが（案 1：図 21）、この場合、総重量約 60 t のイオン源タンクの転倒力を受ける斜支柱の強度が現行よりも弱くなる。このため斜支柱を現状と同じ H 鋼で連結する構造を考案した（案 2：図 22）。この構造により、現行と同程度の支持強度を維持したまま、イオン源タンクを約 600 mm 下げることが可能となった（図 23）。

### 2) イオンダンプタンク

イオンダンプタンクは、イオンダンプタンク本体、上スカート及び下スカート、タンクベースから構成されている。イオンダンプタンク本体には、ビームダンプやクライオポンプとビームコンディショニング時のターゲット及びビームパワー測定機器であるカロリメータが設置されている。上スカート及び下スカートには、カロリメータ圧空シリング機構及びタンク内へのアクセス用階段を設置している。イオンダンプタンクベースの高さは 469 mm のため、タンクベースだけで 600 mm の位置変更は不可である。上スカートはイオンダンプタンクの底面を兼ねており、容易に現場加工や新規製作品と交換することが出来ない。しかし下スカート部（図 24）は、全長は 2961 mm であり、その主な役割は高さ調整であるため、この長さを変更することにより 630 mm 下げることが可能である。ただし放射化の理由から持ち出し加工は不可であり、長さを調整した下スカート部を新規製作する必要がある。また隣接する T-NBI (#9, 10) 用冷却系ヘッダの一部が、イオンダンプタンク下スカート内に入っているため、新規製作する下スカート部にも冷却系ヘッダのための開口部を設ける必要がある。この開口部に関しては、新規製作下スカート（図 25）の全高が 2361 mm に対して、冷却系ヘッダ用開口部の高さが 2201 mm であることから、開口部での側

面は 160 mm しか無く強度低下が懸念される。このためリブ構造をこの部分に適用する予定である。

イオンダンプタンクの位置を 600 mm 下げる場合の大きな改造の 1 つは、カロリメータの移設である。現行のカロリメータはイオンダンプタンクスカート内に圧空シリンダ機構が入っており、床面との距離は 200 mm ほどしかない。したがって、更に 600 mm 下げる場合には、床面を直径 200 mm、深さ 400 mm 程度、掘削する必要がある。掘削に関しては、本体室の強度設計に關係するため、今後、別途検討を進める予定であるが、ここでは掘削を行わない場合としてカロリメータをタンク上部へ移設する方法を検討した。イオンダンプタンク上部に移設するためには、現状のカロリメータ機構及び制御を上下逆転させる必要がある。カロリメータ機構は差し込みと引き抜きの上下動作のみであることから、逆転しても動作に問題は無い。熱電対信号の位置が上下左右逆になるが、測定系側で対処できる。制御ロジックに関しても差し込み・引き抜き方向を合せる事で対応できる。また上下反転しても干渉する構造物はなく、圧空系・冷却系に関しても既存の設備の経路変更や延長にて対応できる。一番の検討課題はビーム軌道軸上にカロリメータ測定部中央が来るよう設置することであったが、変換フランジ付単管を新規製作しイオンダンプタンク上部開口部に設置することで位置合せが可能であることが分かった。これらの検討結果からカロリメータのイオンダンプタンク上部への移設が可能と判断した。

### 3) 中性化セル

中性化セルは中性化セル本体と中性化セル支持柱、及び中性化セルベースから構成されている。中性化セルベースの高さは、350 mm でありベース変更による 600 mm の位置変更は不可である。よって、中性化セル支持柱を短く変更することで検討を進めた。支持柱は縦柱と斜柱と横梁で構成されており、位置変更には縦柱と斜柱に切断加工が必要であるが、作業に関しても持ち出し加工が出来ない制約から縦柱と斜柱は新規製作品と総交換とし、横梁と中性化セルベースは再利用することにした。中性化セルの位置変更の最大の課題は、支持柱と中性化セルベース内に設置しているステージとビームライン機器用冷却ヘッダとの干渉である。このステージにはビームライン機器受熱盤、ビームライン現場盤、中性化セルガス導入盤等重要機器が設置されており、その高さは各盤の高さとビームライン機器用冷却ヘッダ配管との位置関係から変更出来ない。このため支持柱設計の具体的な寸法については今後、詳細な検討が必要である（図 26）。

### 4) メンテナンスステージ

メンテナンスステージ（図 27）は、ステージの 4 階構造になっており、1~2 階は接地電位のステージ、3~4 階はイオン源にアクセスするステージであり、またイオン源へソースプラズマ生成電源を供給するため最大 500 kV の電位がかかる。このため 2 階から 3 階の間には高電位を絶縁するため FRP の絶縁柱を使用している。また 1 階の床面には負イオン源ソース部や加速部電極冷却用ヘッダが設置されている。これらの構造上の制約から位置変更は床面から 3 階までの部分で検討することにした。1 階から 2 階間は、負イオン源冷却ヘッダとの干渉を避けるように改造し、2 階から 3 階は絶縁距離に配慮しながら高さを変更する。現在の案は 2 階と 3 階の間の絶縁柱（FRP 柱）を絶縁距離限界まで詰めて 500 mm 下げ、残りの 130 mm を負イオン源冷却ヘッダとの干渉を避け、床面から 2 階までの柱（鉄製）を短くすることで対応する予定である。

#### 4. 現行設備の解体

JT-60U 実験運転終了後、真空容器の冷却期間をはさみながら NBI 装置から解体撤去を順次行っていく。解体作業は半年間の短期限で行うことが要求されており、また NBI 装置関係は再利用を視野に入れながら解体、撤去を行う必要がある。さらに磁気シールドの強化など改造が必要な部分は、再組立時の改造作業を想定した解体作業を立案する必要がある。このため NBI 装置に関しては、解体のみならず改造関係の手順や工程もあわせて検討を進めている。

##### 4. 1 解体・撤去範囲

JT-60SA では、NBI ユニット数が現在の 15 (P, T, N-NBI) ユニットから 13 ユニット (P-NBI 2 台縮小) になる。再利用しないユニットは P-NBI の #11, 12 ユニットである。検討初期は P-NBI の下ユニット (#1, 3, 13) は残し、他のユニットを撤去することで JT-60U の解体及び JT-60SA 本体の据付作業が可能としていたが、その後、本体の組立作業を効率よく進めるために P-NBI は全て撤去することとなった。なお現在 P-NBI の #2, #13 ユニットの主排気タンクの偏向磁石電源供給部の真空接続部からスローリークを起こしていることから、全ての P-NBI の主排気タンクを撤去した後、#11, 12 を #2, #13 に交換する予定である。一方、磁気シールド対策の検討結果から、現行の中性化セルに新たに電磁軟鉄を取り付けるため主排気タンクからイオン源と中性化セルを引く抜く作業が必要である。しかしこの作業を主排気タンクの撤去時に行うと、短期間（半年間）の解体期限では収まらないため、解体作業時から据付作業時へ先延ばしする作業工程を立案した。以下に検討結果を示す（図 28）。

- ① P-NBI 垂直 10 ユニットは、上下ともすべて、解体・撤去し、発電機棟等に一時保管する。下ユニットのタンクは下スカートと一緒に撤去とする。
- ② #11, 12 の 2 ユニットは、配管用ヤグラを含めて完全撤去するが、再据付時には、旧#12 タンクは#2 へ、#11 タンクは#13 へ移設する（旧#2 と旧#13 の両タンクはスローリークしているため）。
- ③ JT-60 実験棟地下の PIG 室内にある#11/12 用機器は、SF6 ガスダクト（本体室から一体）×2 本、HVT2×2 台、貫通孔配管・配線等であり、これらは完全撤去する。#12 用 IT-P は#11 用エリアへ移動して、地下 PIG 室から本体室への JT-60SA 用電源経路を確保する。
- ④ 解体工期の短縮のために接線タンク 2 基(4 ユニット) は、解体時、据置きとする。ただし打消コイル水冷化改造時に別途、吊上げ・移動、再据付が必要である。
- ⑤ T-NBI#7/8 ビームラインの入射角度が時計方向 2° 偏心を必要とする場合（真空容器の NBI ポートの最終設計に依る）、④項と同じ対応を行う。
- ⑥ PNBI 大口径ゲート弁ゲート弁は、主排気タンクからサポートされている構造のため、上下ユニット共主排気タンクと一緒に吊出を行う。
- ⑦ T-NBI の入射ポート部（ポートと大口径ゲート弁が一体）は、近接 P-NBI から支持している。このため P-NBI を解体撤去時の同ポート部の支持方法が出来なくなる。この課題は、撤去手順

及び再据付時の改造と併せて今後、検討を進める。

⑧ 改造作業は、放射化物の切断・溶接等が本体室・組立室以外では禁止のため、次のとおり対応する。

- ・ P-NBI、T-NBI、N-NBI の各機器水配管内の乾燥作業を、撤去前に本体室で行う。
- ・ P-NBI、T-NBI の漏洩磁場増大対策は再据付期間中に組立室で行う。但しクレーン作業を伴うため複数を同時に行うことは困難であり、十分な据付作業期間の確保が必要である。
- ・ P-NBI のドリフト部改造は、再組立て時に行う。解体・撤去時は組立室で閉止板取り付け後に発電機棟一時保管とする。再組立て時までに新規変換フランジと長さ調整単管を製作しておく必要がある。

⑨ 発電機棟での一時保管品は、保守用の真空排気が禁止なので窒素封入で密封保管を原則とする。なお据付け時に主排気タンク内作業があり、この作業前には大気置換を行う。

#### 4. 2 解体手順

JT-60U の解体は、組立室に解体・撤去要作業場所の確保が優先となるため、組立室側にある N-NBI 機器から撤去作業を始める（図 29）。

- ① N-NBI メンテナンスステージの解体・撤去を行う。ステージベース部は撤去範囲外とする。
- ② N-NBI 高電位テーブル（HVT）の撤去を行う。Y3 壁から高電位テーブルへ接続されている電源ケーブルを分離後、高電位テーブル屋上に吊り耳を溶接し、2階から上の部分を一括で吊上げ、大型輸送車にて搬出する。その後、1階ベース上の絶縁柱を分解・撤去する（図 30）。
- ③組立室に解体スペースが確保出来たら、JT-60U 直上の計装架台を分離、撤去して組立室へ搬出する。その後所定の保管場所へ移動する。
- ④星形トラスアーム部の撤去のため、P-NBI 上ユニットとヤグラ間の 5 階ステージの解体撤去を行う。対象ユニットは、#2、4、6、12、14 の 5 ユニットである。
- ⑤5 階ステージ撤去後、星形トラスアームの分解・撤去を行う。
- ⑥P-NBI 上ユニットの分離作業を行う。切り離し部は、NBI ポート途中から溶断にて切り離しを行い、大口径ゲート弁は主排気タンクと一緒に撤去する。解体順序は #6 → #4 → #2 → #12 → #14 と撤去する。
- ⑦P-NBI 下ユニットの分離作業を行う。切り離し部は、NBI ポート途中から溶断にて切り離しを行い、大口径ゲート弁は主排気タンクと一緒に撤去する。解体順序は #5 → #3 → #1 → #11 → #13 と撤去する。
- ⑧P-NBI 主排気タンクの撤去が完了したら、#11、12 用ヤグラの撤去を行う。
- ⑨解体撤去した部品は放射化対策のため、開口部に閉止板を取付けた後、発電機棟へ搬送し保管する。
- ⑩T-NBI 及び N-NBI ビームラインは、JT-60U 解体撤去時に移動しなくても作業に支障が無いため据え置きとする。

これらを基にした解体スケジュール案を図 31 に示す。他設備とのクレーン使用等の干渉がなけれ

ば、ほぼ半年間で NBI 設備の解体が可能と考えられる。

## 5.まとめと今後の進め方

### 5.1 まとめ

3次元 CAD を用いて、JT-60SA に必要な NBI 加熱装置のビームラインの改造及び解体撤去の予備検討を行い以下の結果を得た。

- 1) JT-60SA クライオスタットと NBI 装置との取合い部に関して、現行の構成機器の再利用を考慮した接続方法を検討した。P-NBI に関してはドリフト部の全長が現行より短くなるが、大口径ゲート弁改造（アンシール機構追加）、高速シャッタの撤去、変換フランジ挿入により、機能を確保しつつ JT-60SA との取合い条件に合せることが出来た。
- 2) JT-60SA の漏洩磁場増加に伴う、NBI 機器の磁気遮蔽材の取り付け方法を 3 次元 CAD により検討した。この結果、中性化セル外装周りは最大 30 mm の磁気遮蔽材を追加することが可能であることが分かった。また主排気タンク周辺の磁気遮蔽材は 180 mm まで追加できることも明らかとなった。
- 3) N-NBI ビームラインの水平位置下げ変更（約 600 mm 下げ）に関しては、イオン源タンクベースの新規製作、イオンダンプタンクの下スカートの新規製作とカロリメータの上部移設、中性化セル部の支持柱の新規製作が必要である。
- 4) JT-60U 設備の解体範囲及び手順は、NBI の解体範囲の縮小及び解体手順短縮化を基本として検討を行った。この結果、約半年間で NBI 機器の撤去を行う作業手順案を示すことができた。

### 5.2 今後の進め方

NBI 機器の取合いに関しては、本体真空容器側の NBI ポートの設計の進捗状況に応じて T-NBI ユニット及び N-NBI ユニットとクライオスタットとの取合い部の設計を進める必要がある。また 100 秒化のため NBI ポート内のビームリミタ、最電離保護板等については水冷化が必要であり、その取り付け方法等の検討が必要であり、今後、NBI 機器との取合いと並行して冷却配管取合い検討を合せて進める。このように 3 次元 CAD を効果的に使用することで、JT-60SA に必要なビームラインの改造・解体箇所、手順を明らかとし、実際の作業の合理化を目指す予定である。

## 謝　　辞

本報告書をまとめるにあたり、粒子ビーム加熱システム開発グループの皆様に感謝を申し上げます。また、本技術検討遂行にあたり終始変わらぬ御指導、激励を頂きました細金延幸トカマクシステム技術開発ユニット長、山本巧研究主席、宮直之研究主席に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- [1] M. Kikuchi, et al., " Overview of modification of JT-60U for the satellite tokamak program as one of the broader approach projects and national program" , Synopsis for 21st IAEA Fusion Energy Conference (Oct. 2006, Chengdu, China).
- [2] Y. Ikeda et al., " Technical design of NBI system for JT-60SA" , Proc. 24<sup>th</sup> Symp. Fusion Tech., Warsaw, Poland, September, 2006, P3-B-336.
- [3] 大賀徳道 他、「接線入射 NBI 装置の建設」、JAERI-Tech 95-0044.
- [4] 河合視己人他：私信

## 図表リスト

表 1	NBI 基本性能	11
図 1	NBI 加熱装置配置図	11
図 2	P-NBI 取合い部	13
図 3	クライオスタット取合い部拡大図	13
図 4	新規 NBI ドリフト部	15
図 5	変換フランジ	15
図 6	長さ調整単管	15
図 7	P-NBI 主排気タンク全景	17
図 8	P-NBI 主排気タンク断面	17
図 9	P-NBI 内蔵機器外観 1	17
図 10	P-NBI 内蔵機器外観 2	17
図 11	中性化セルと主排気タンク内部	19
図 12	中性化セル	19
図 13	ビームスクレイパとの距離	19
図 14	中性化セル外装	21
図 15	主排気タンクと本体間距離	21
図 16	距離拡大図	21
図 17	距離詳細図	21
図 18	N-NBI ビームライン位置変更比較	23
図 19	イオン源タンク	23
図 20	現在のイオン源タンクベース	23
図 21	タンクベース（案1）	25
図 22	タンクベース（案2）	25
図 23	タンクベース（案2）使用後改造比較	25
図 24	イオンダンプタンク下スカート	27
図 25	新旧下スカート比較	27
図 26	中性化セル改造比較	29
図 27	メンテナンスステージ	29
図 28	解体・撤去検討範囲図	31
図 29	NBI 解体手順	33
図 30	高電位テーブル（HVT）分解手順	35
図 31	NBI 解体撤去工程（案）	37

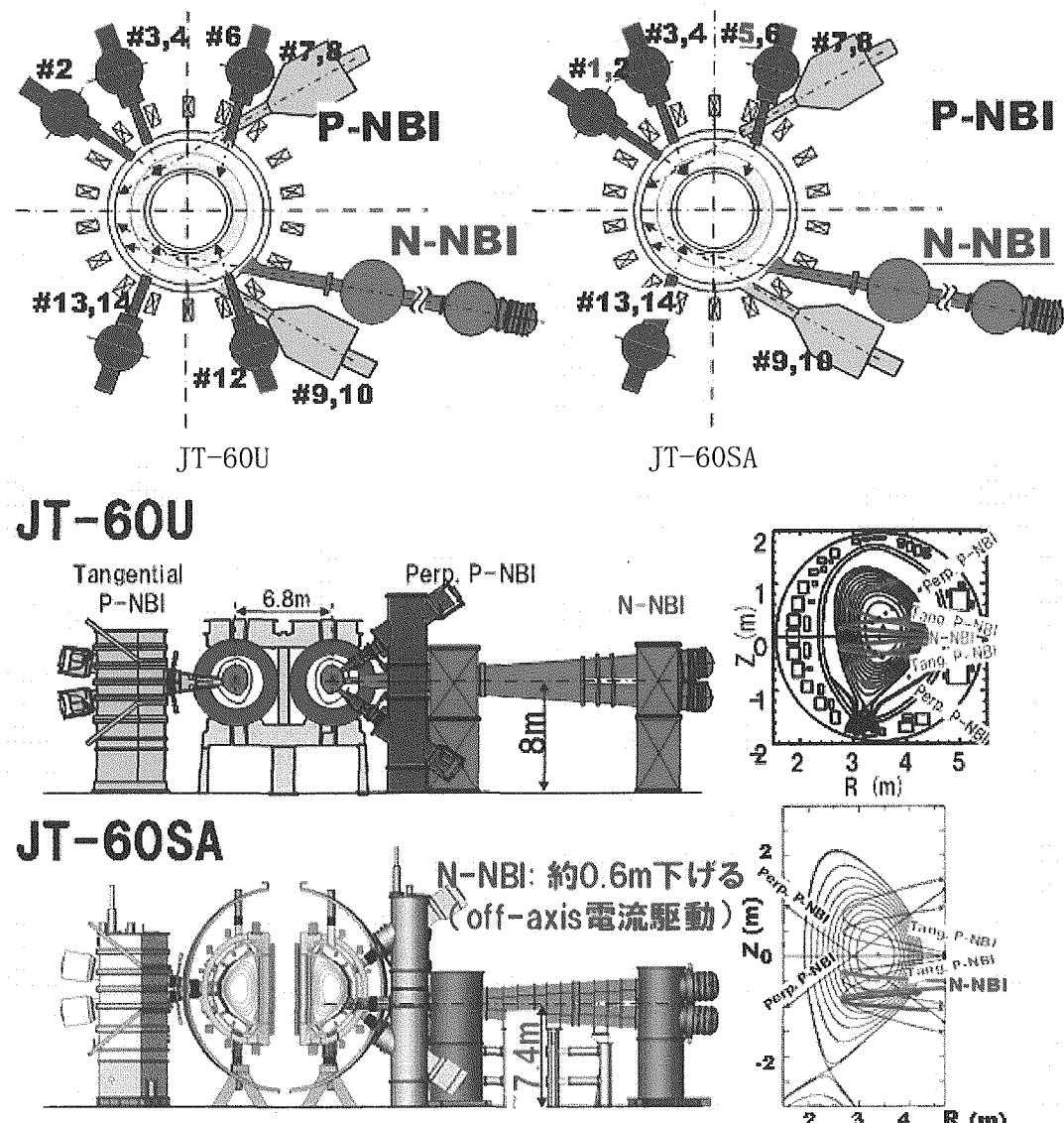


図1 NBI 加熱装置配置図

表1 NBI 基本性能

			JT-60U(実績)	JT-60SA(目標)
加熱性能			~15 MW x 30秒	34 MW x 100秒
P-NBI	接線	順	2 MW x 2 ユニット x 30秒 (85 keV)	2 MW x 2 ユニット x 100秒 (85 keV)
		逆	2 MW x 2 ユニット x 30秒 (85 keV)	2 MW x 2 ユニット x 100秒 (85 keV)
	垂直		2 MW x 7 ユニット x 30秒 (85 keV)	2 MW x 8 ユニット x 100秒 (85 keV)
N-NBI			3.2 MW x 1 ユニット x 21秒 (320 keV)	10 MW x 1 ユニット x 100秒 (500 keV)

This is a blank page.

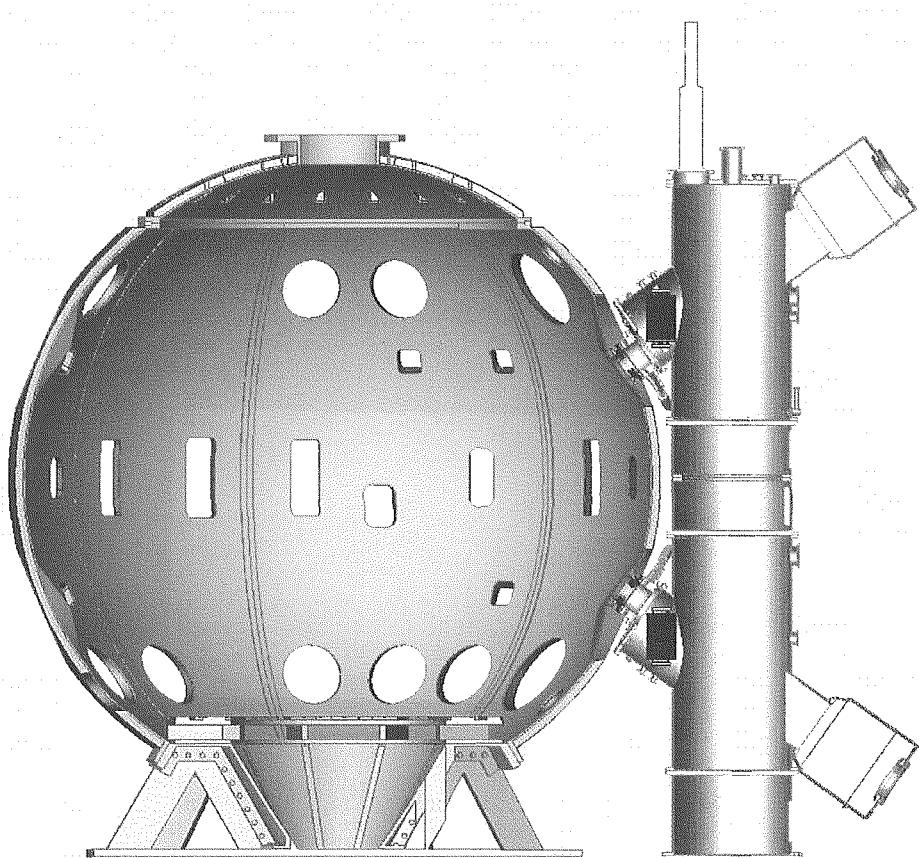


図2 P-NBI 取合い部

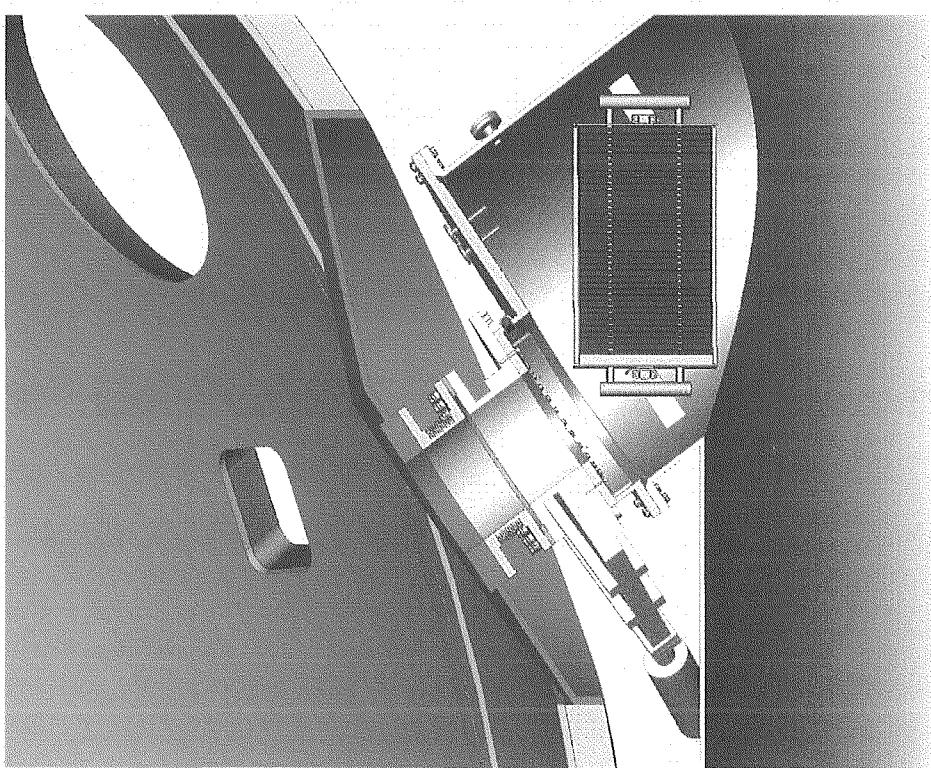


図3 クライオスタット取合い部拡大図

This is a blank page.

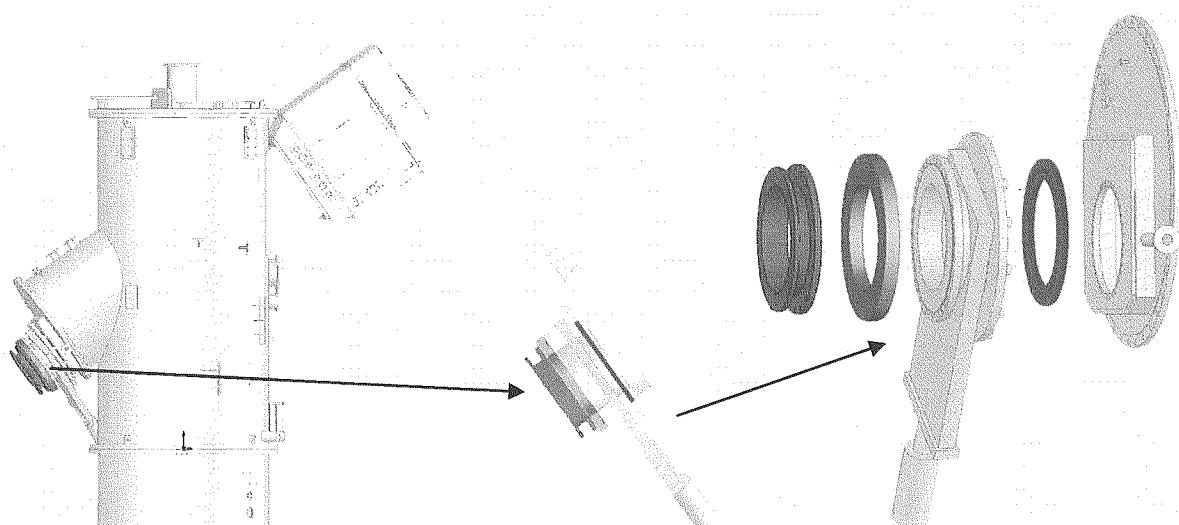


図4 新規NBIドリフト部

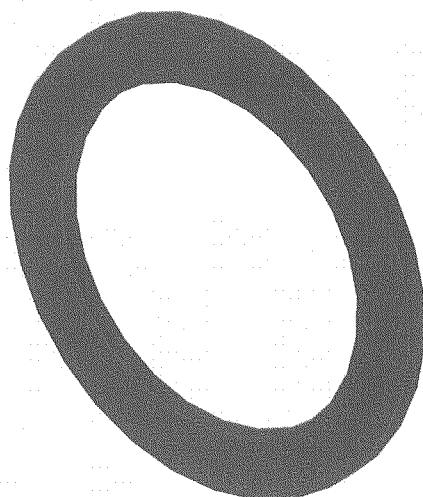
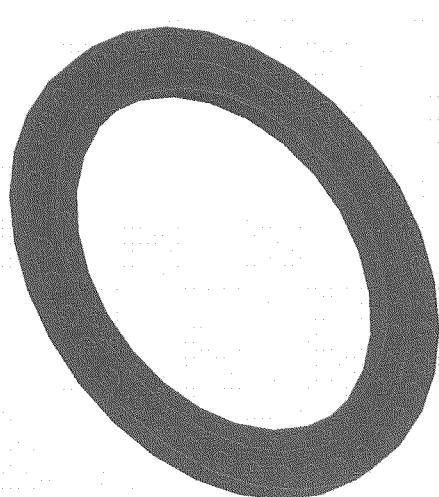


図5 変換フランジ (JT-60SA側)



変換フランジ (NBI側)

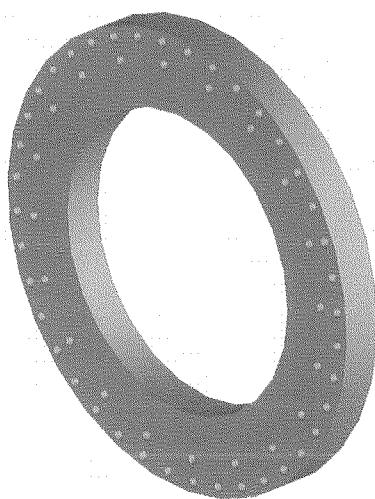
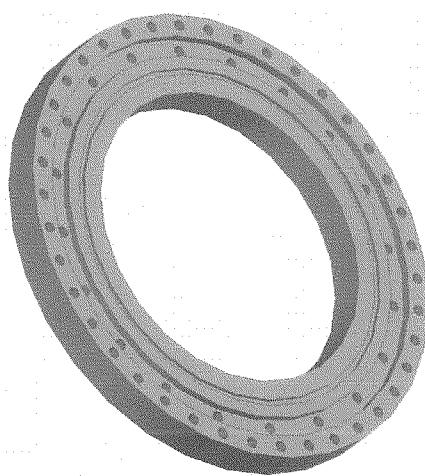


図6 長さ調整単管 (JT-60SA側)



長さ調整単管 (NBI側)

This is a blank page.

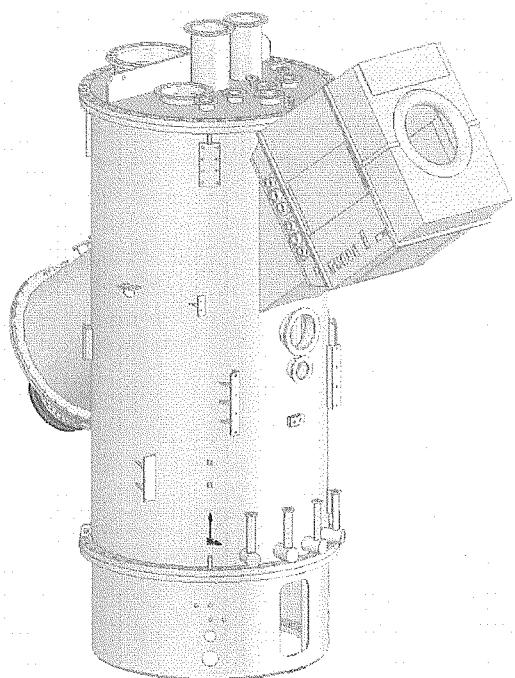


図 7 P-NBI 主排気タンク全景

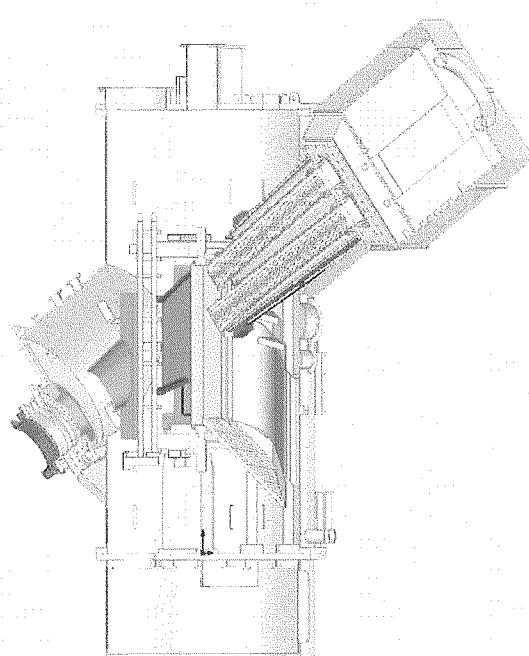


図 8 P-NBI 主排気タンク断面

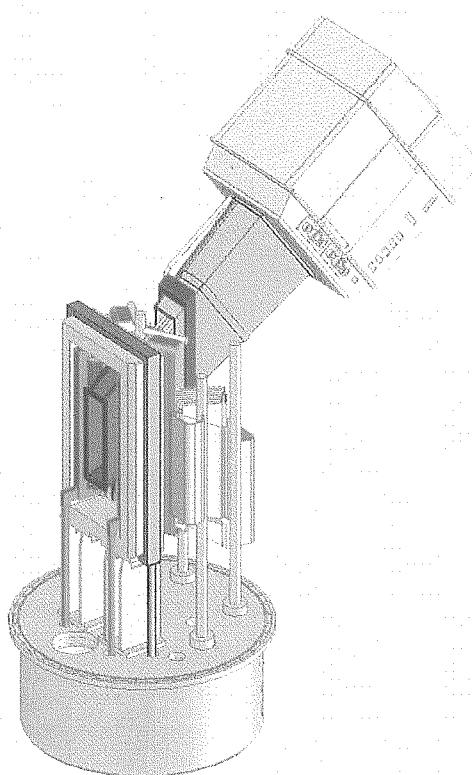


図 9 P-NBI 内蔵機器外観 1

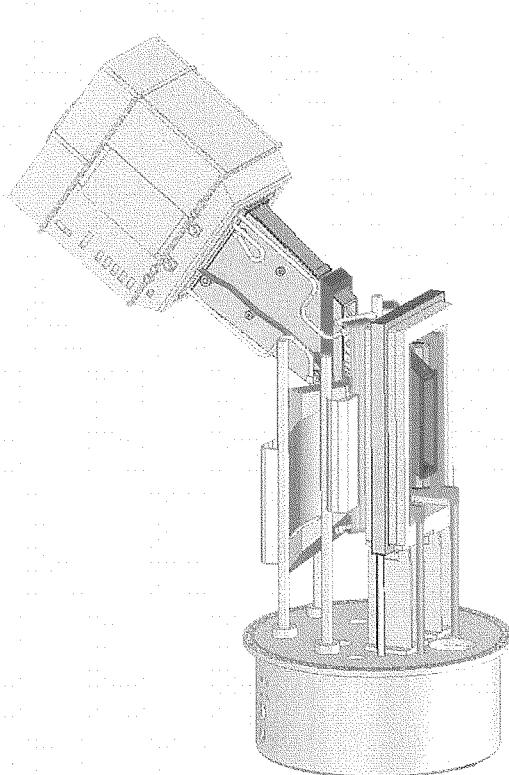


図 10 P-NBI 内蔵機器外観 2

This is a blank page.

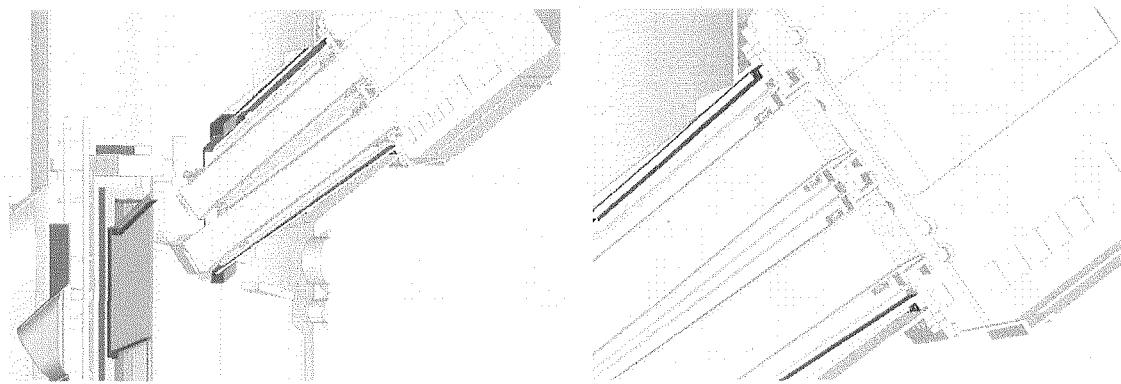


図 11 中性化セルと主排気タンク内部

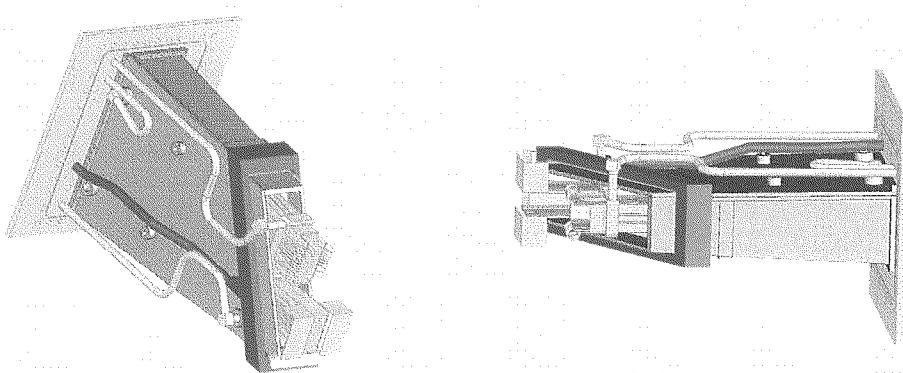


図 12 中性化セル側面

中性化セル上面

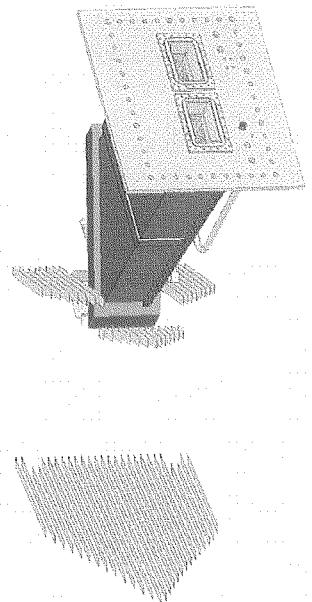


図 13 ビームスクレイパとの距離

This is a blank page.

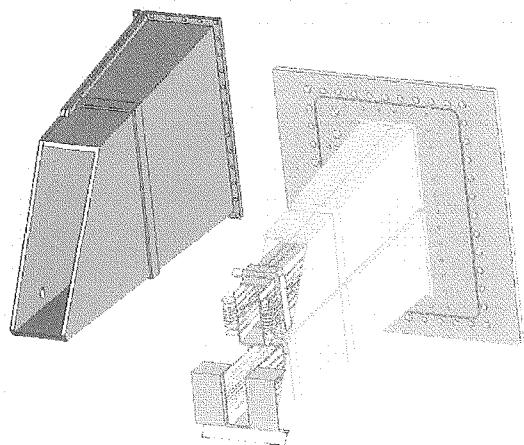
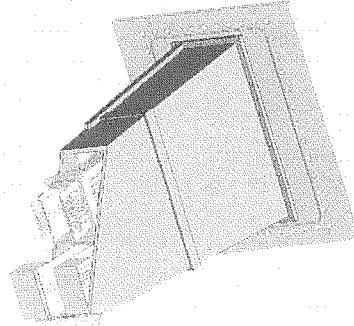


図 14 中性化セル外装(外装分離状態)



中性化セル外装一体状態

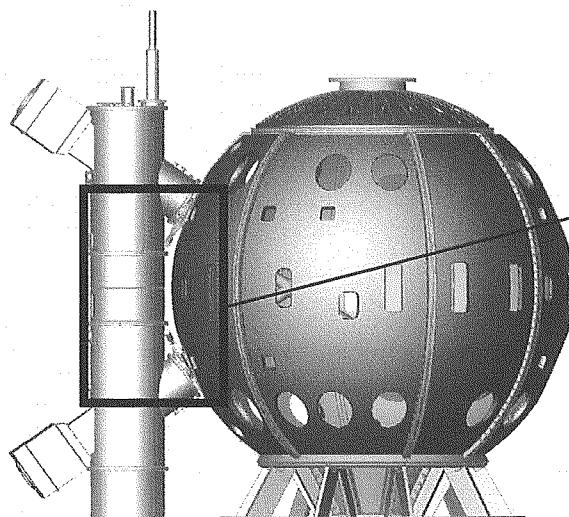


図 15 主排気タンクと本体間距離

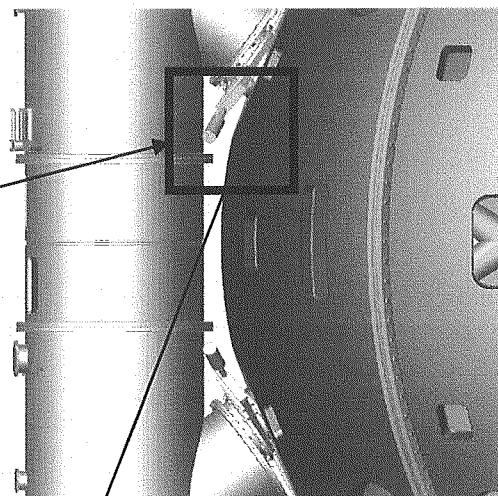


図 16 距離拡大図

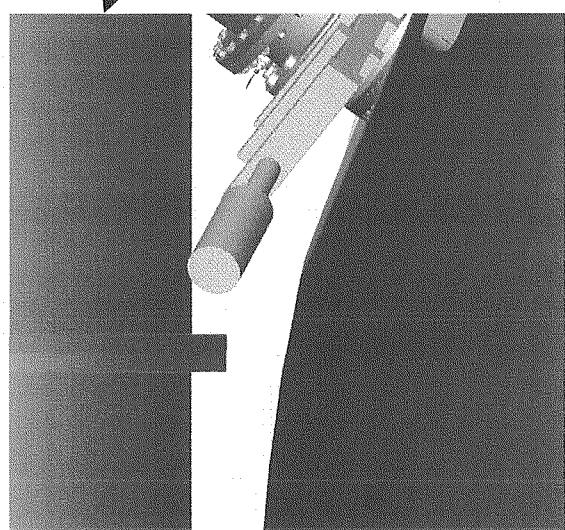


図 17 距離詳細図

This is a blank page.

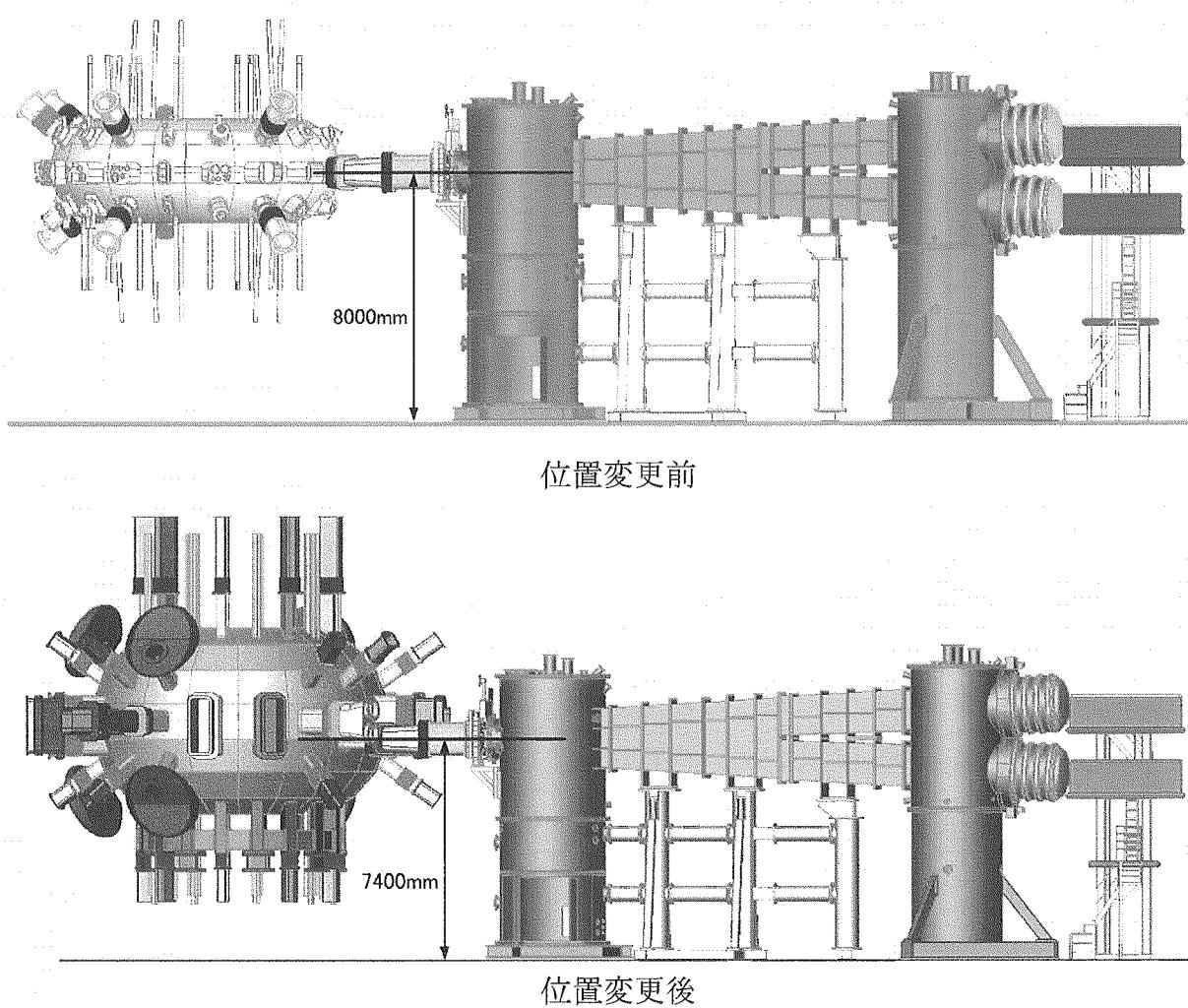


図 18 N-NBI ビームライン位置変更比較

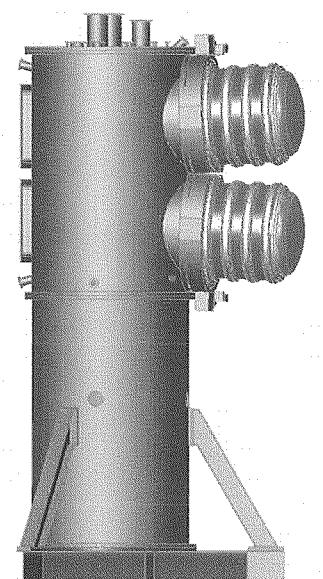


図 19 イオン源タンク

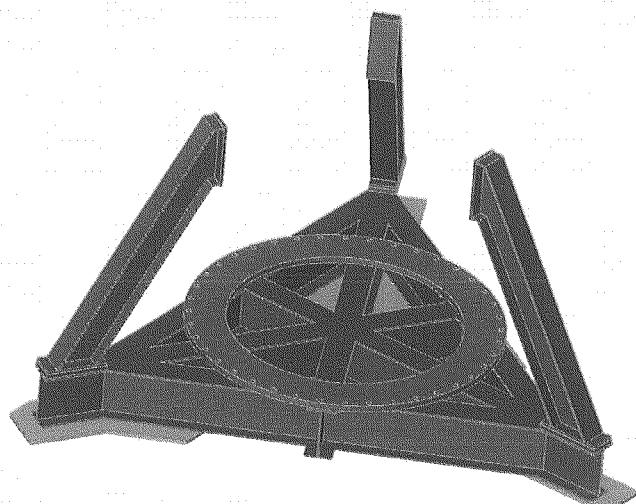


図 20 現在のイオン源タンクベース

This is a blank page.

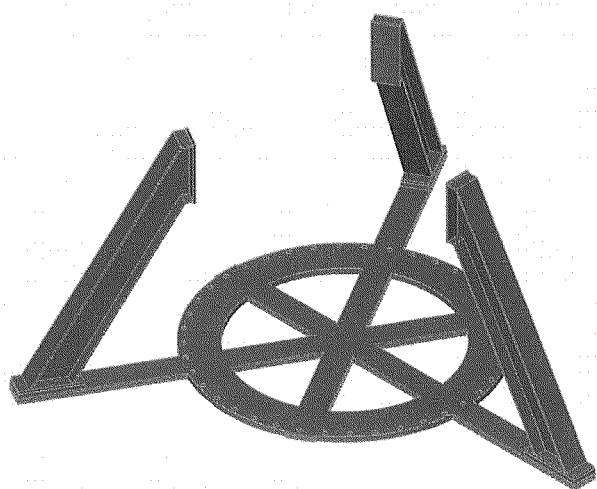


図 21 タンクベース（案 1）

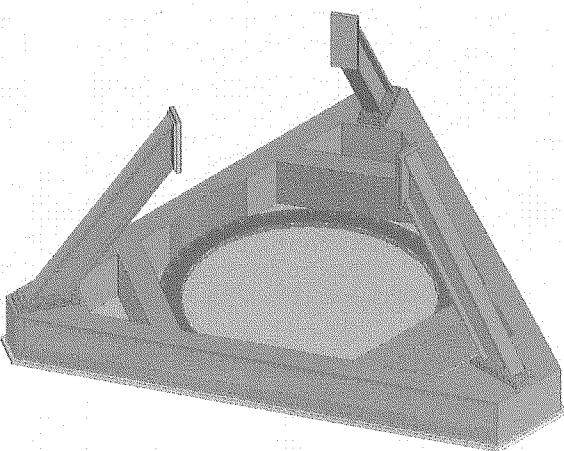


図 22 タンクベース（案 2）

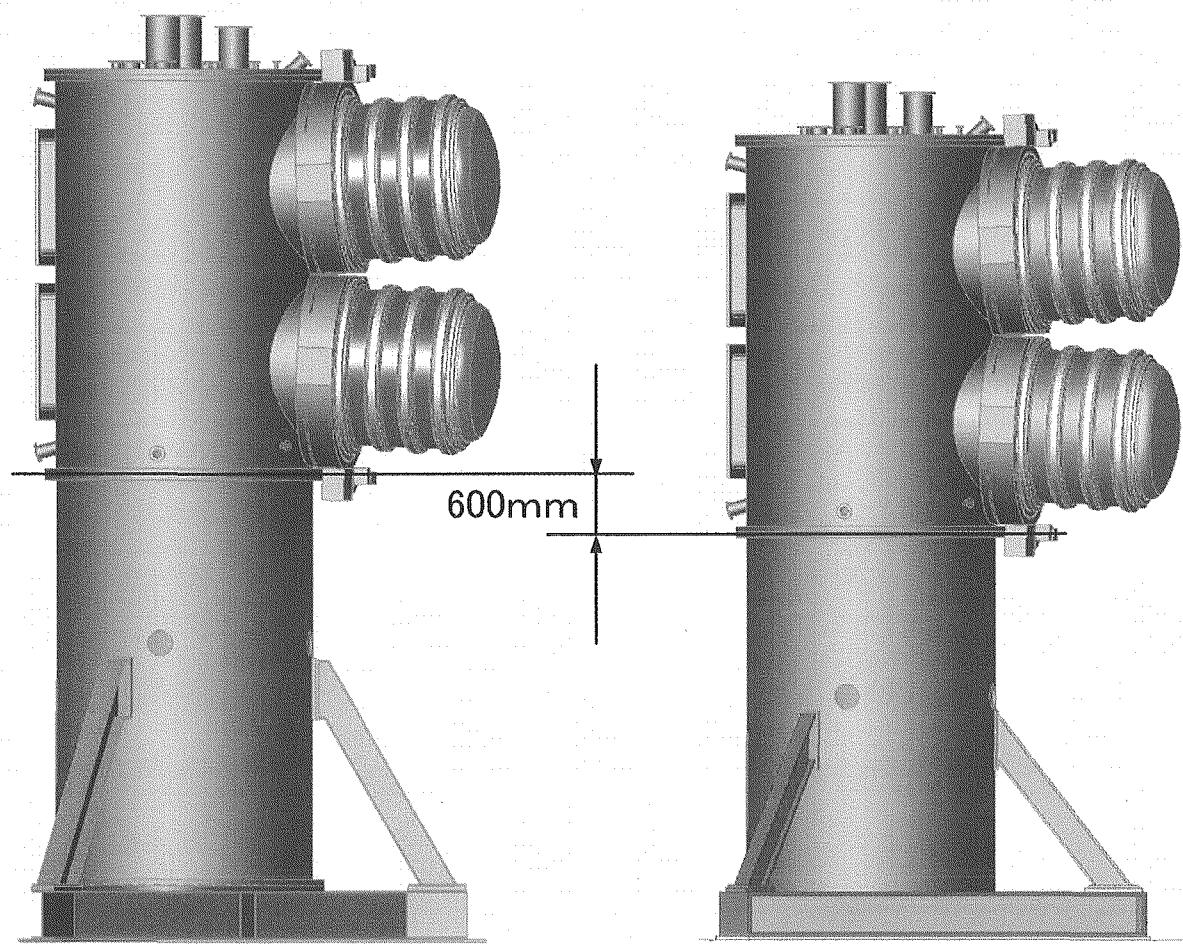


図 23 タンクベース（案 2）使用後改造比較

This is a blank page.

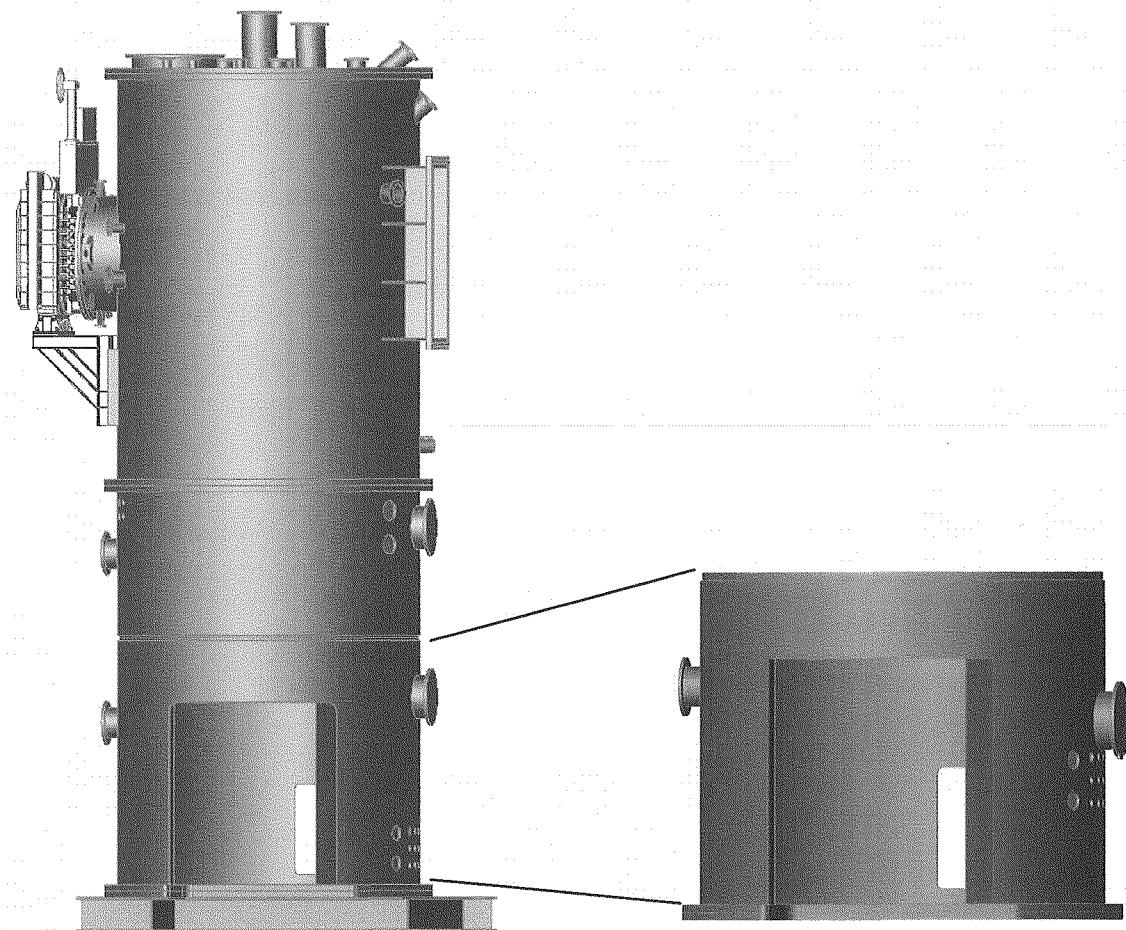
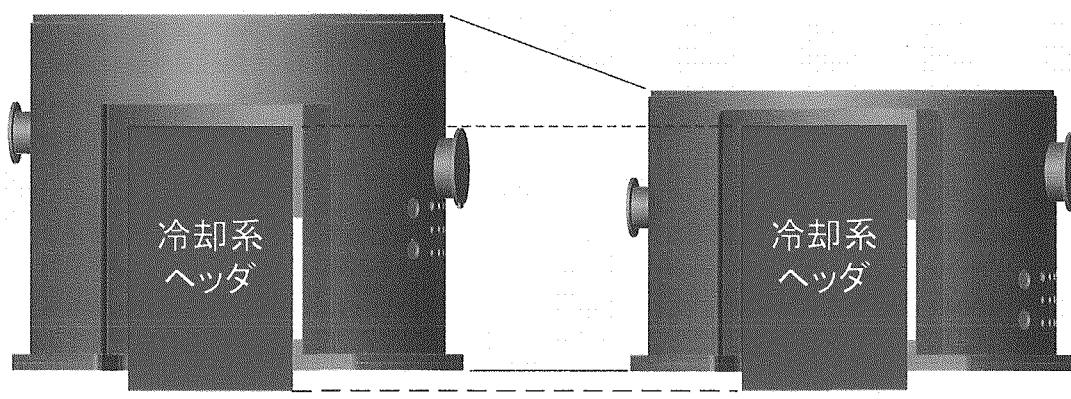


図24 イオンダンプタンク

下スカート



改造前下スカート

改造後下スカート

図25 新旧下スカート比較

This is a blank page.

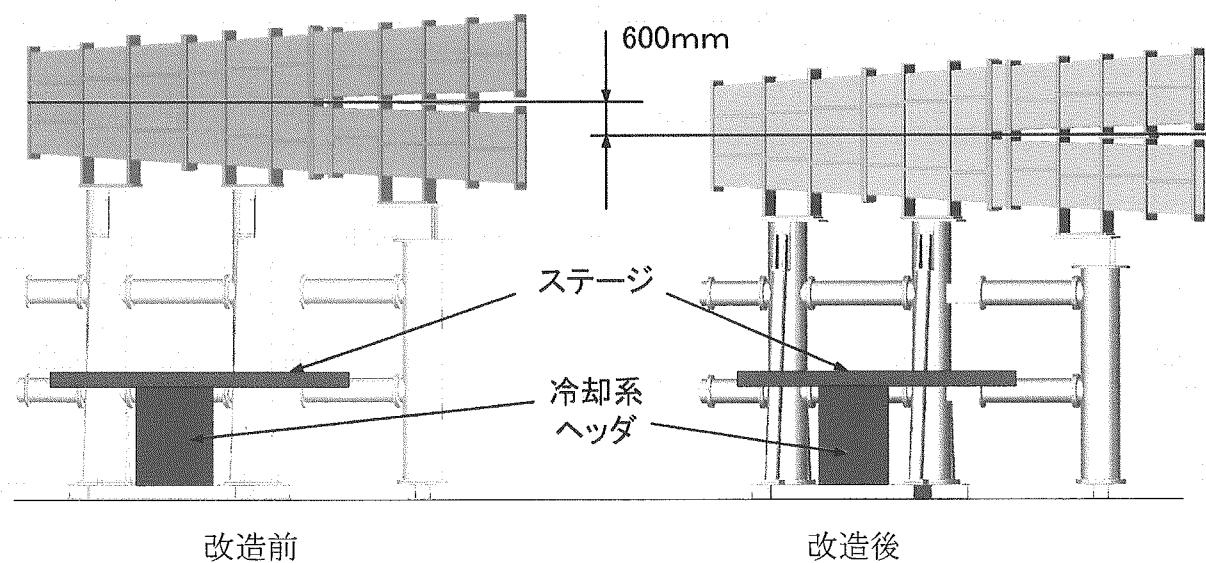


図 26 中性化セル改造比較

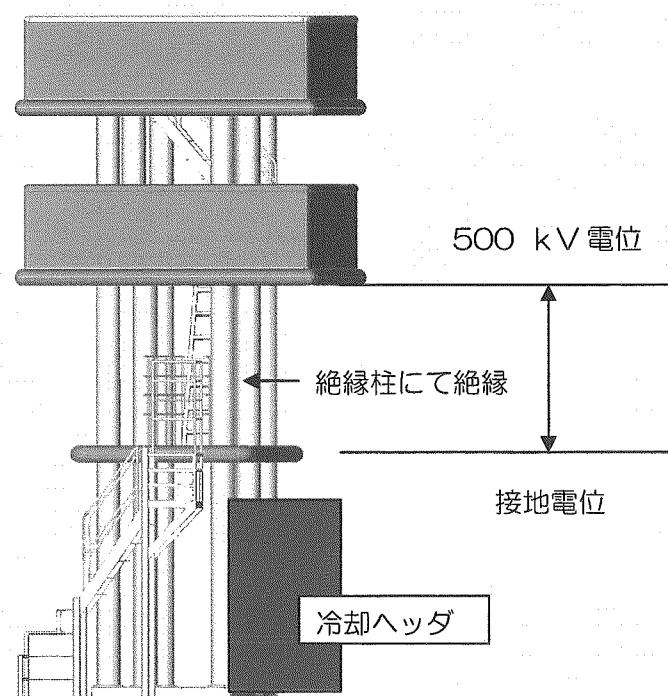


図 27 メンテナンスステージ

This is a blank page.

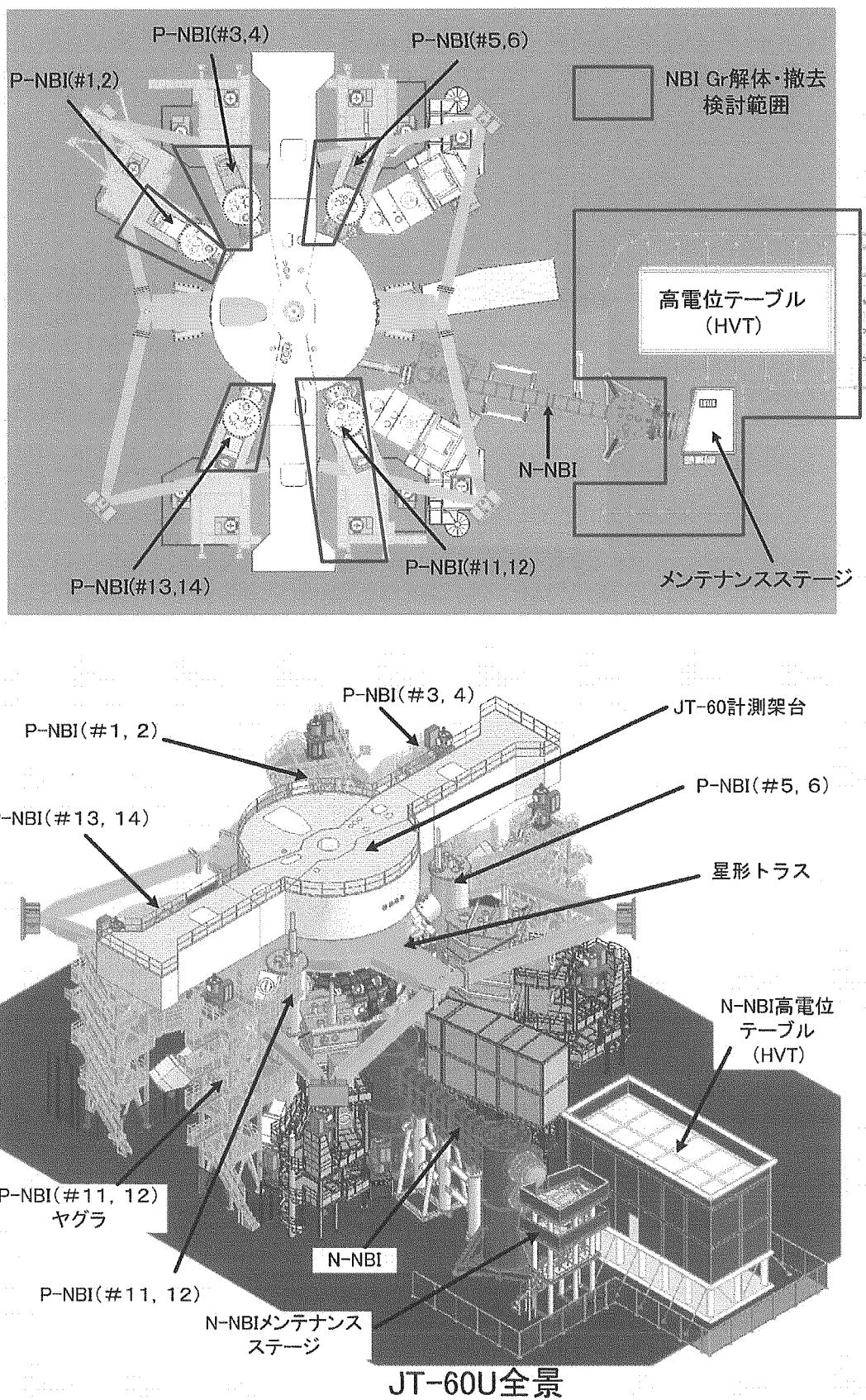
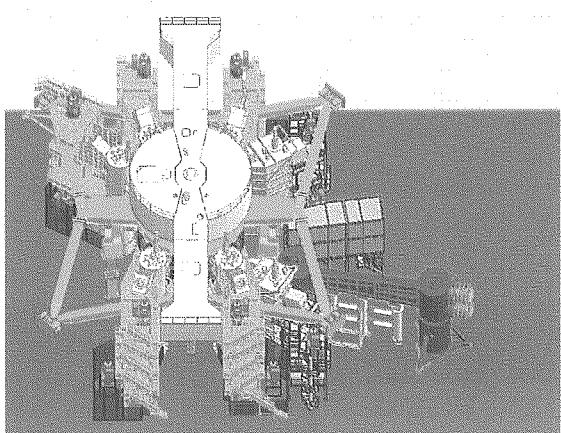
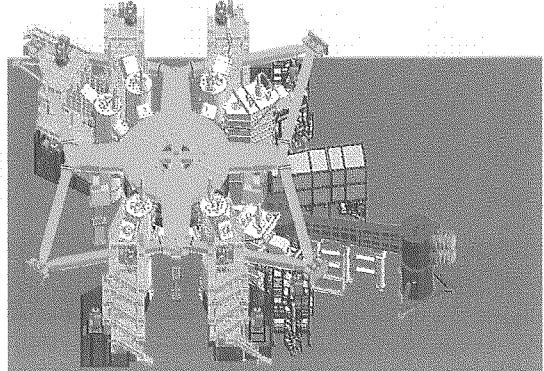


図 28 解体・撤去検討範囲図

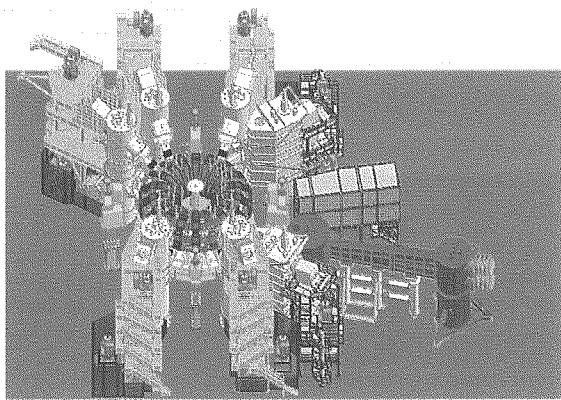
This is a blank page.



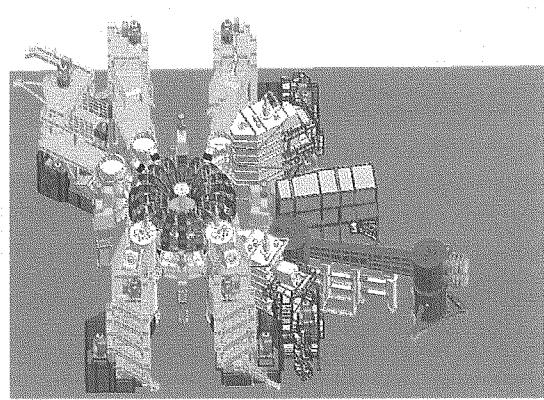
解体手順 1



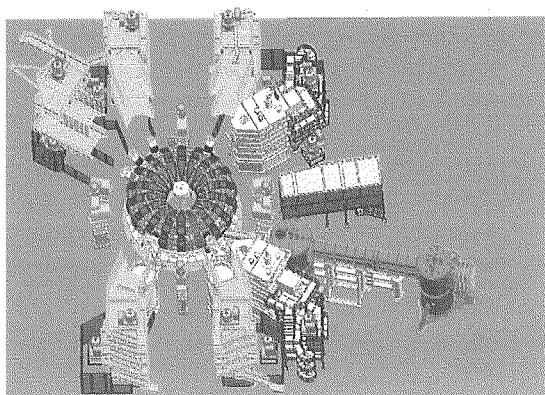
解体手順 2



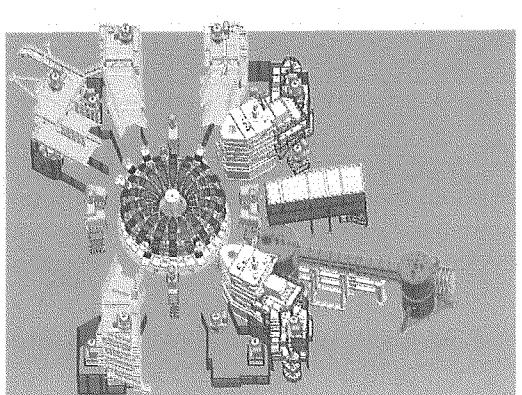
解体手順 3~5



解体手順 6



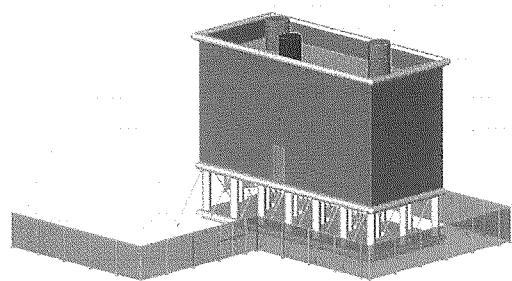
解体手順 7



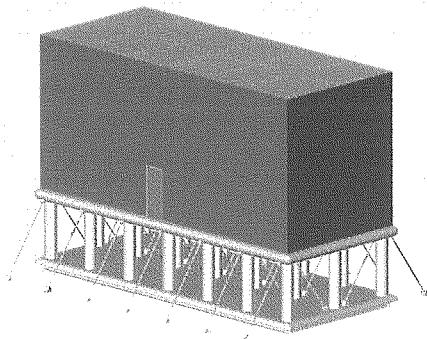
解体手順 8

図 29 NBI 解体手順

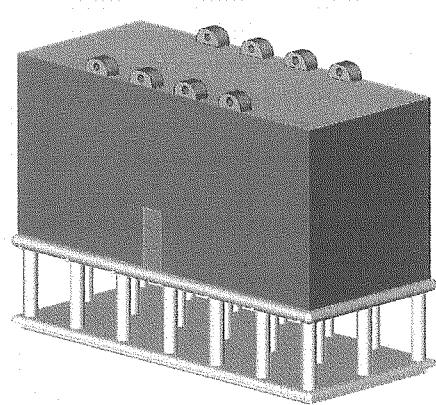
This is a blank page.



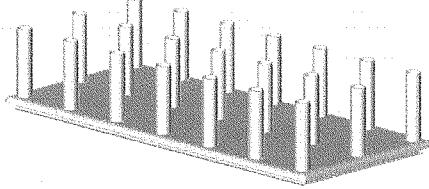
(1) 高電位テーブル (HVT) 分解開始



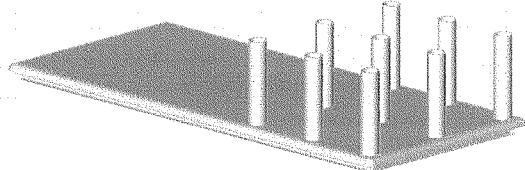
(2) 安全柵、HVT 上部機器撤去



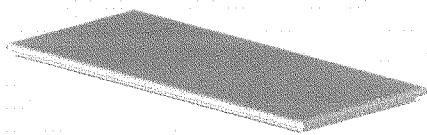
(3) HVT 上部に吊り治具溶接



(4) HVT 2～4F を吊り出し撤去



(5) HVT 1～2F 間の絶縁柱の撤去



(6) 絶縁柱撤去後、1F ベース撤去

図 30 高電位テーブル (HVT) 分解手順

This is a blank page.

平成22年度(2010)										
	6	7	8	9	10	11	12	H23/1	2	3
JT-60U実験運転										
JT-60U本体 計測架台 星形トラス										
<組立室> NBI設備解体撤去主要項目 ・N-NBI SF6ガスダクト、架線 HVT 保守ステージ NBI自営撤去項目 負いオシノ源2台一組立室保管										
<NNB>										
500kV架線、ガスダクト一部外し 保守ステージ解体 負いオシノ源外し2台 HVT2分割解体作業 NNBIC一ムライン内部点検										
<PNB>										
・P-NBI 上uタンク×5 下uタンク×5 ・" 垂直シャツタ×10 ・" GV1×10 ・" 接線GV1×4 ・" 接線水一ト×2 ・" #11,12ヤグラ・配線/配管 (接線タンク×2は据え置き) ・N-NBI ポート (イオンダンプタンク、中性化セル は据え置き) NBI自営撤去項目 ・正イオン源24台 ・イオン源室へ保管 ・タンク内部機器点検										
<NINB>										
<PIG室> #11,12 HVT2×2 #12 IT-P 移動										
他設備との干渉項目 1)シャッター切り欠き作業と第1種管理 区域内作業 2)全ての作業におけるクレーンの取扱い										
#11,12 SF6ガスダクト解体 #11,12 SF6ガスダクト解体 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12ヤグラ内配管配線撤去・ヤグラ2分割 搬出・廃棄 #11,12 HVT2 分解搬出保管 #11,12 HVT2 分解搬出保管 #12 IT-P 移動										

図31 NBI解体撤去工程(案)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
(物質量)の濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$	$m \cdot m^{-1}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$	$m^2 \cdot m^{-2}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$	$s^{-1}$
圧力	ニュートン	N	$N \cdot m^{-2}$	$N \cdot m^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジューール	J	$N \cdot m$	$N \cdot m$
功率,放射束	ワット	W	$J/s$	$J/s$
電荷,電気量	クーロン	C	$W/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	$C/V$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
静電容量	フアラード	F	$V/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
電気抵抗	オーム	Ω	$A/V$	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
コンダクタンス	スージメンス	S	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	東ウエーバー	Wb	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	スヘルス	T	$Wb/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
光度	セルシウス度	°C	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
(放射性核種の)放射能吸収線量,質量エネルギー一分与,カーマ	ベクレル	Bq	$lm/m^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
線量当量,周辺線量当量,方向性線量当量,個人線量当量,組織線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$	$m^2 \cdot s^{-2}$

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形成するときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量,エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エンタルピー	毎ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) rad$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) rad$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) rad$
リットル	L	$1L = 1 dm^3 = 10^{-3} m^3$
トン	t	$1t = 10^3 kg$
ネーベル	Np	$1Np = 1$
ベル	B	$1B = (1/2) ln 10 (Np)$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV = 1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u = 1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua = 1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アーチル	a	$1a = 1 dam^2 = 10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha = 1 hm^2 = 10^4 m^2$
バール	bar	$1 bar = 0.1 MPa = 100kPa = 1000hPa = 10^5 Pa$
オングストローム	Å	$1 Å = 0.1 nm = 10^{-10} m$
バイン	b	$1 b = 100 fm = 10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg = 10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn = 10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P = 1 dyn \cdot s/cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストーカス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホルト	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-3} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = 1 Gy = 10^{-2} Gy$
レン	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$
X線単位	X unit	$1X unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジヤンスキー	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カロリ	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロン	μ	$1 μ = 1 μm = 10^{-6} m$