

JT-60SA に向けた NBI 加熱装置の解体

小又 将夫^{*1}, JT-60NBI 開発グループ

^{*1} 日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）那珂核融合研究所の核融合試験装置（JT-60U）においては、2008 年に実験運転を終了した後、2016 年のファーストプラズマを目指し、欧州と共同で同装置を全面改修し、超伝導コイルを用いた JT-60SA（JT-60SuperAdvanced）を建設する予定である。JT-60U の主力加熱装置である中性粒子入射加熱装置（NBI 加熱装置）は、一旦撤去し、必要な改造を実施した後、JT-60SA で再使用することが計画されている。

本稿では、2009 年から開始されている NBI 加熱装置の解体の進捗状況と今後の予定について報告する。

2. JT-60 NBI 加熱装置の概要

NBI 加熱装置はプラズマへ重水素の中性粒子ビームを入射し、プラズマを追加加熱する装置である。NBI 加熱装置は 1 次粒子を生成するイオン源、ビームライン機器（1 次イオンを中性化するガスセル、中性化されなかったイオンを処理するイオンダンプ、クライオポンプ等）及びドリフトダクト等で構成されている。

JT-60U 用 NBI 加熱装置は、大別すると、1 次イオンの電荷が正イオンの NBI（P-NBI）装置と負イオンの NBI（N-NBI）装置の二種類で構成されている。P-NBI 装置は全体で 14 ユニットから成り、このうち 10 ユニットがプラズマに対して垂直方向に入射する位置に配置され、残りの 4 ユニットはプラズマに対して接線方向に入射する位置に配置されている。図 1 に JT-60U

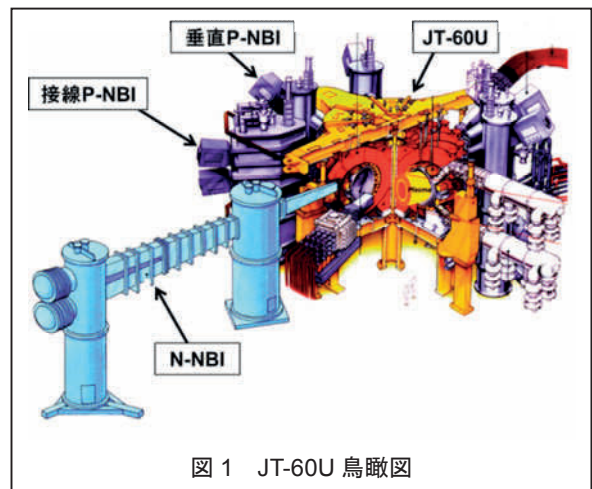


図 1 JT-60U 鳥瞰図

鳥瞰図を示す。垂直 P-NBI においては全てのビームライン機器は NBI 真空タンク（主排気タンク）内に収納されている。NBI 主排気タンクは 2 台を 1 組として、上下方向に接続されており、イオン源及び中性化セルは上下対称の位置に配置されている。2 台を 1 組とした NBI 主排気タンクは本体真空容器の周りに 5 箇所設置されている（図 2）。接線 P-NBI においては、ビームをプラズマに対して接線方向に入射するように、イオン源及び中性化セルが配置されており、真空容器周りに 2 箇所設置されている（図 3）。

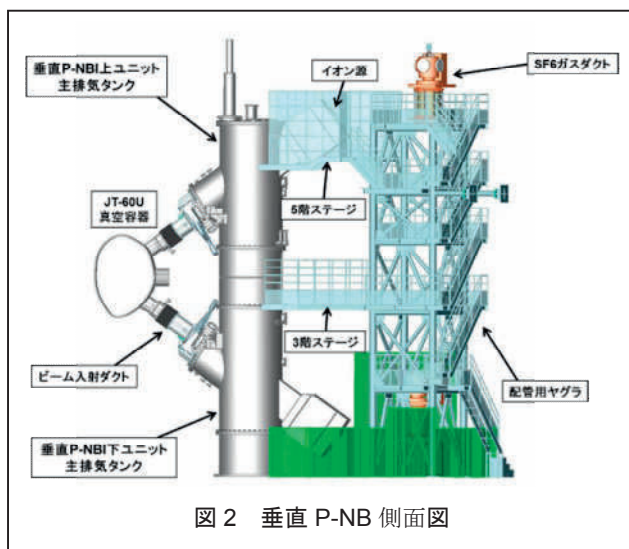


図 2 垂直 P-NBI 側面図

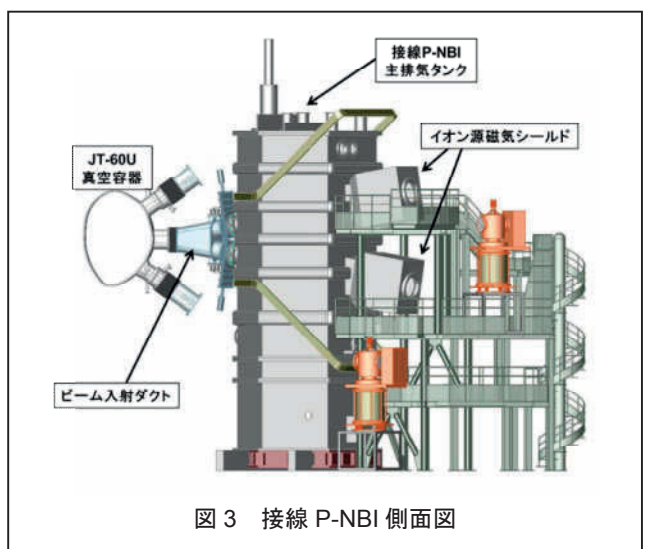


図 3 接線 P-NBI 側面図

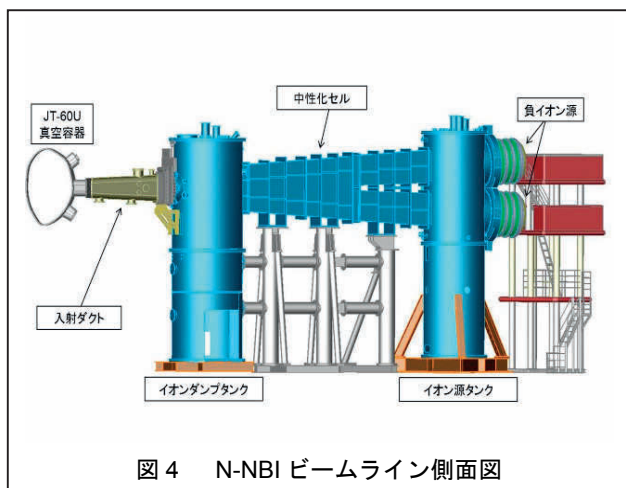


図 4 N-NBI ビームライン側面図

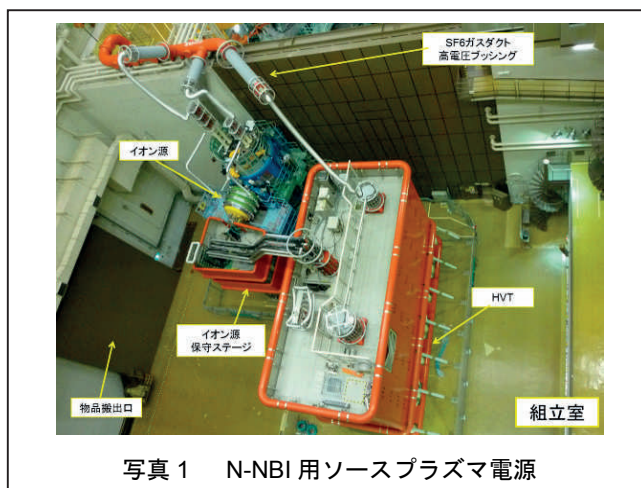


写真 1 N-NBI 用ソースプラズマ電源

N-NBI は、1 ビームラインから成りイオンダンプタンク、中性化セル、イオン源タンク、負イオン源、イオン源保守ステージ、高電位テーブル（HVT）、SF6 ガスダクトで構成されている（図 4）。写真 1 に N-NBI の心臓部である負イオン源及び同電源に電力を供給するための電源（N-NBI 用 HVT）等を示す。

3. NBI 加熱装置の解体作業の概要

原子力機構では、核融合に関する幅広い計画（BA 計画）の一環として、JT-60U の後継機である JT-60SA を新規に製作し、商業炉に向けた先進的なプラズマ研究及び ITER への支援研究を実施する。図 5 に NBI 加熱装置の改造計画図を示す。NBI 装置に関しては、JT-60SA においても必要となる改造を行った後に再使用する予定であり、P-NBI 装置 12 基と N-NBI 装置 1 基を用いて、合計 30MW の重水素中性粒子ビームを 100 秒間プラズマへ入射する予定である。

本体真空容器及びプラズマ閉じ込め用磁場コイルの設置のために、NBI 装置は解体撤去し、再使用までの期間、別の放射線管理区域内に一時保管する。NBI 装置の解体撤去は、2009 年 11 月から開始しており、2012 年 1 月に完了する予定である。NBI 装置の解体撤去作業の概要を以下に示す。

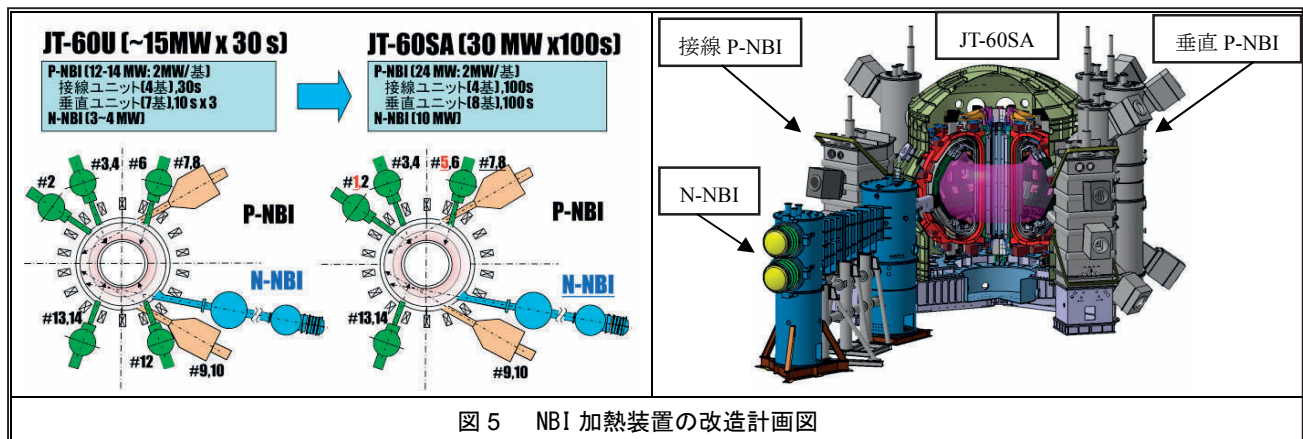


図 5 NBI 加熱装置の改造計画図

(1) 基本方針

- ・NBI 装置のほとんどの構成機器は JT-60SA で再使用するため、解体作業に当たっては機器の機能を損なうことなく作業を実施する。また、NBI 主排気タンクは、JT-60U で設置していた位置に戻すので、解体前に現状の設置位置をレーザーなどで測定した後、撤去する。
- ・既存の NBI 装置は、中性子の照射を受けているため、構成機器は放射化物として取扱う。放射化物の取扱いは放射線障害防止法に従う。
- ・JT-60SA で再使用する解体撤去品は、新たに設けた放射線管理区域内へ運搬し、そこで保管・管理する。再使用しない機器は、機器ごとにタグを取付けて、管理台帳に登録し、専用の保管容器に収納する。

・ビーム入射ダクト等の本体真空容器に通ずる機器は微量ながらトリチウムに晒されているので、開口部を閉止フランジで封止した状態で保管する。JT-60SA で不使用なダクトは、開口部を閉止後、専用の金属性の密閉容器に収納して保管する。

・解体作業で実施する切断作業は、空気汚染拡大防止のために、原則パイプカッターやセイバーソー等のヒュームや切粉の発生が少ない工具を用いて実施する。プラズマやガスによる溶断機を用いる作業は、内部被ばくを防止するために、排気設備を有するグリーンハウス内で実施する。

(2) P-NBI の解体

垂直 P-NBI の NBI 主排気タンクは約 $\phi 2.5 \times 8\text{m}$ （高さ）であり、内蔵するビームライン機器を含めた重量は約 52 トンである。JT-60SA では 10 ユニットのうち 8 ユニットを再使用し、2 ユニットは使用しない。JT-60SA で再使用する NBI 主排気タンク、イオン源、配管、配線、メンテナンスステージ、安全柵等は解体撤去し、別棟の放射線管理区域で保管する。これらの機器の中で最重量機器でありかつ放射線管理上も取扱いが難しい NBI 主排気タンクの解体・撤去の手順を以下に示す。

- ① NBI 主排気タンクの吊出し前に、タンクと JT-60U 本体真空容器に通ずるビーム入射ダクトのボルトを取外し、ベローズを縮めて切り離す。その際、ダクト及びベローズ周辺を酢酸ビニールシートで囲い、汚染の拡大を防止する。取り外した後の開口部には閉止板を取付ける。
- ② また、本体真空容器に通じている NBI 主排気タンクへ接続されている配管の撤去に関しては、ダクト同様の手続きで、撤去する。但し、作業性を考慮し、開口部は酢酸ビニールシートで簡易的に閉止する。
- ③ NBI 主排気タンクへの接続部が完全に切り離されている事を確認した後、NBI 主排気タンクを専用治具で吊出し、本体室から組立室へ移動する。
- ④ 組立室内で、主排気タンクの全ての開口部に金属製フランジを取付ける。
- ⑤ NBI 主排気タンクに取り付いている金属シールゲート弁と高速シャッタを専用の治具で取り外す。
金属シールゲート弁は、必要な改造を実施して JT-60SA でも再使用する。そのため、フランジ面を閉止板で保護して保管場所で保管する。高速シャッタについては JT-60SA では再使用しないため密閉容器に収納する。
- ⑥ その後、NBI 主排気タンク内部を真空にし、窒素ガスで封入する。NBI 主排気タンクは低床トレーラーに積載して保管場所へ運搬し、そこで再据付けまで保管する。

接線 P-NBI の主排気タンクは、約 $5 \times 3.5 \times 15\text{m}$ （高さ）、重量約 130 トンの重量物であり、内部には、2 組のビームライン機器が収納されている。接線 P-NBI の主排気タンクは、イオン源磁気シールドと入射ダクト部および配管ヤグラからの配管、配線等を外して、本体真空容器から切り離すものの、工期短縮及びコスト削減のために、JT-60SA の組み立てに影響しない位置に移動し、そこで保管・管理する。垂直 P-NBI 同様、タンク内部を真空に引き、窒素ガスを封入する。JT-60SA で再使用するケーブル等の付属品は解体撤去後、別棟の管理区域で保管する。

(3) N-NBI の解体

N-NBI ビームラインは、接線 P-NBI 同様に本体室内で保管管理し、JT-60SA で再使用する。JT-60SA では、現状より 55cm 下げた位置からビームをプラズマへ入射することが要求されているため、保管期間中に、位置下げに必要となる改造を実施する。

入射ダクト部は、N-NBI タンク側に接続される中間ベローズの溶接部をグラインダー等により切離し解体する。

入射ダクト部を支持しているヤグラ部は、大きさ約 $3.5 \times 3.1 \times 9.2\text{m}$ 、重量約 12 トンの SUS 製のヤグラである。このヤグラも #11/#12 配管用ヤグラ部と同様に、工期短縮のため別棟の放射線管理区域に運搬後、グリーンハウス内でプラズマ切断にて細断し保管容器に収納する。

4. NBI 加熱装置の解体作業の進捗状況

JT-60U 中心の真空容器の周辺部にある NBI 装置から解体を開始した。表 1 に示す工程表に基づき、解体を進めており 2009 年に、解体品の搬出ルートを確認することを目的に、搬出口のルート上に設置されている N-NBI 用 HVT 等の解体作業を撤去した。

次に上下方向に接続される上側の主排気タンクの撤去のために、同タンクに接続されているケーブルや配管類の内、高所作業を伴わないものに関しては、コスト削減のために、原子力機構職員によって撤去した（表 1 中の自営解体作業）。その後、同タンクに接続されている配管や地上 5 階にある保守ステージを 2010 年 6 月中旬から 9 月初旬の期間に撤去した。また、同作業期間に平行して、JT-60SA で再使用予定のないユニット（図 5 の#11,#12）の配管用ヤグラの解体を実施した。今後、2011 年に全ての垂直 P-NBI の解体撤去、接線 P-NBI 移動及び N-NBI の一部撤去を完了する予定である。

表 1 NBI 加熱装置の概略解体工程

	2009年	2010年			2011年			2012年
JT-60U								
NBI加熱装置								
N-NBI HVT等	■							
配管用ヤグラ部			■					
5階ステージ			■					
垂直P-NBI上ユニット					■			
接線P-NBI入射ダクト					■			
垂直P-NBI下ユニット						■		
N-NBI入射ダクト部						■		
N-NBI入射ダクト部ヤグラ						■		
P-NBI接線ユニット							■	
(自営解体作業)	■	■	■	■				

以下に、2010 年 12 月現在までに実施した機器の解体撤去の詳細について紹介する。

(1) N-NBI 用 HVT 等の解体

上述の様に、解体品の搬出ルート確保のため組立室内に設置している HVT とイオン源保守ステージ及び SF6 ガスダクトと高電圧ブッシングの解体作業を実施した。本作業の詳細は、平成 21 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会報告集 藻垣和彦「JT-60U 中性粒子入射装置の解体・改造手順」に示されている[参考文献]。

(2) P-NBI #11/#12 配管用ヤグラ部の解体

P-NBI の配管用ヤグラ部は、上下ユニットの NBI 主排気タンクのイオン源、ビームライン機器へ供給する冷却水配管、真空配管等の各種配管、電源ケーブルや電線管、ケーブルダクト、クライオポンプへの冷媒配管等及び現場の制御盤等を収納している。概略寸法は 4×4×14m（高さ）、概略重量 32 トンの 6 階建ての複雑な大型構造物である。写真 2 の破線部に配管用ヤグラ部を示す。P-NBI の#11 と#12 の 2 ユニットは、3.(2)項で述べたように JT-60SA では再使用しない。そのため、今後の解体作業時の作業空間を確保するために、#11/#12 配管用ヤグラ部を初期の時期に解体する計画とした。配管用ヤグラ部の解体作業は主に接続ボルトを外すことによって実施した。また、溶接箇所など加工機による作業は、現場の作業性、放射線管理、コストを総合的に判断して実施した。具体的には、現場ではヤグラを二分割し、その後別棟

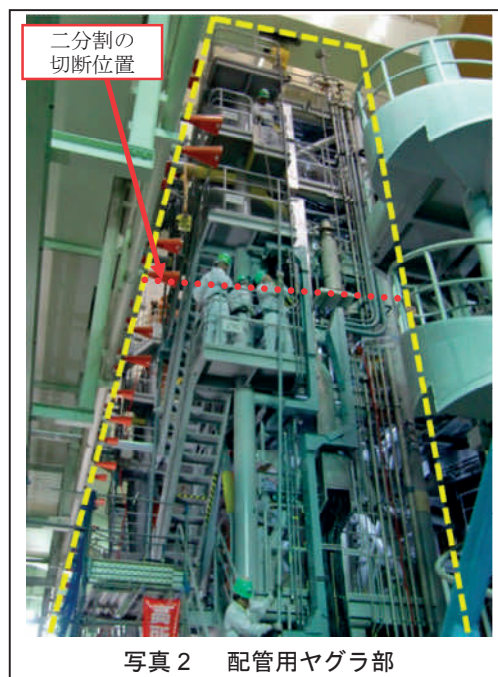


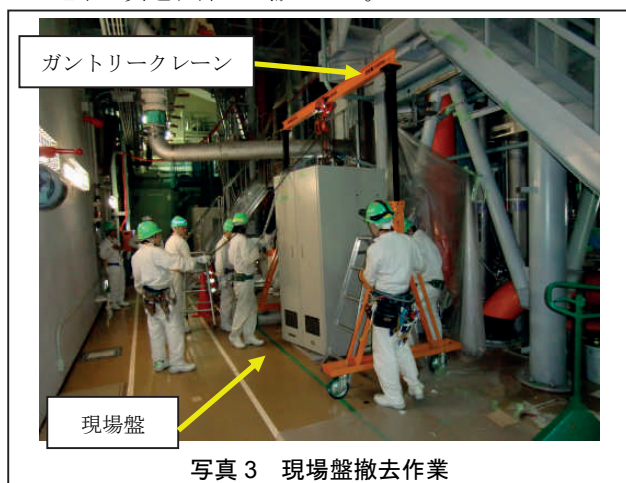
写真 2 配管用ヤグラ部

の作業性、放射線管理、コストを総合的に判断して実施した。具体的には、現場ではヤグラを二分割し、その後別棟

の放射線管理区域内にあるグリーンハウス内で細断する。現場での切断作業は、作業スペースが小さかったため、切断機として比較的狭い空間で利用できる自走式パイプカッターを用いた。作業の際は切断機の周辺部をビニールシートで囲い、切り粉等の飛散を抑制した。作業手順を以下に示す。

① 各現場盤、ケーブル、ケーブルダクト等の撤去

- ・配管用ヤグラ内のケーブルは、運搬及び収納し易いようにケーブルカッターで切断し、約 2m の長さ単位でまとめて保管容器に収納した。
- ・各現場盤は、天井クレーンにより吊出しが不可能である。そのため簡易式の電動ホイス及び簡易移動式のガントリークレーンを使用して効率よく撤去した。又、撤去できない大型の盤については、盤内部の部品を極力撤去し盤筐体はヤグラ内に残しヤグラ運搬後に解体した。写真 3 に現場盤撤去作業を示す。
- ・ケーブルダクトのうち SF6 ガスダクトに関しては、解体前に SF6 ガスの大気放出を防止するためガスの回収作業を実施した。回収したガスボンベ 2 本(90kg)も放射線管理区域内で保管管理している。
- ・SF6 ガスダクトの経路は配管用ヤグラ部を通り、地下の電源室からイオン源近傍までであり、垂直 P-NBI 主排気タンクの上ユニットまでの距離は約 15m である。このように長尺の配管を安全に撤去するために、ダクトを天井クレーンで吊った状態で、接続ボルトを取り外した。写真 4 に SF6 ガスダクト撤去作業を示す。ダクトを外す場合は内部のケーブルが自重で落下して危険である。そのため、ダクトを慎重に引抜きながら各階ごとに内部のケーブルを手すり等に固定（落下防止のため）しながら解体した。ケーブルはダクトを引抜き後切断した。写真 5 に SF6 ガスダクト内ケーブル切断作業を示す。外管撤去、内管撤去、→ケーブル切断の手順を繰り返しながら効率良く、地下の貫通孔部まで撤去した。



② 各種配管、ステージ、安全柵等の撤去

- ・配管用ヤグラ内には NBI 主排気タンクへ接続する冷却水、ガス、圧縮空気、冷媒、ドレン、真空等の配管（サイズ 10A から 300A）が設置されている。配管の取外しは、基本的には接合フランジ部で取外した。それ以外の配管についてはパイプカッターで切断して撤去した。又、パイプカッターが使用できない場所についてはバンドソーや

セイバーソーを用いて切断した。外した配管は、運搬し易いように約3本を一塊として、保管容器に収納した。

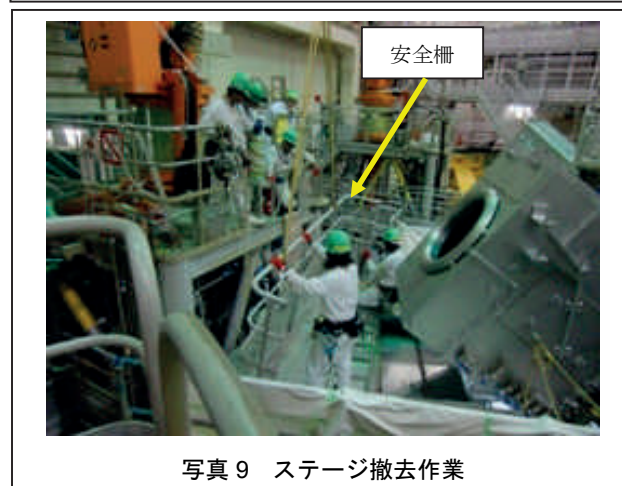
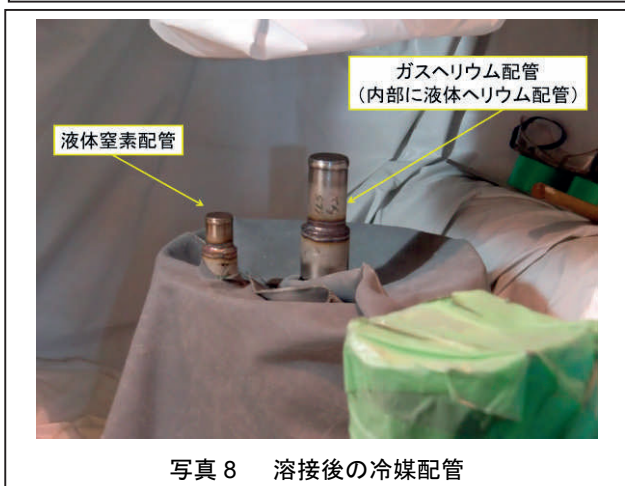
・各種配管のうち真空配管を撤去する際にはトリチウムによる内部被ばく防止のために、作業員は半面マスクなどの防護具を付けた。外した真空配管は汚染拡大防止のため両端をビニールシートで密封して専用の密閉容器に収納した。写真6に真空配管撤去作業を示す。

・冷媒配管は本体室地下から NBI 主排気タンク内のクライオポンプへ冷媒を供給する特殊な多重管であり、液体ヘリウム管、ガスヘリウム管と液体窒素管が内蔵されており、多重管内部は真空状態に維持されている。JT-60SA で不使用となる#11/12 ユニットの多重配管を撤去した。多重配管の切断は、外管の外周の上下をグラインダーで切り込んでタガネにて切断してからグラインダーで縦割りにして取外した。同様な作業手順で内部の残りの配管もパイプカッターとグラインダーにて切断した（写真7）。切断後の冷凍機側の配管は金属プラグを溶接することによって閉止した（写真8）。閉止後は、高圧ガス保安法の一般高圧ガス保安規則に基づき PT 検査、耐圧検査、気密検査を内部配管を含めて実施した。本作業を実施するに当たっては、主作業場所である地下に放射線管理のための作業エリア、脱衣エリア、汚染検査エリアを設置した。区画化した作業エリア内で作業のために、HEPA フィルタに接続された排風機を設置した。

・冷却水配管については取外作業に際しては、漏水による汚染拡大を防止する必要があるため、事前に機構職員により配管内部に残留する冷却水の水抜作業を実施し、漏水防止に努めた。

・重水素ガス配管については、切断前にガスを回収し、空気で置換した。

・配管用ヤグラから NBI タンクの間には NBI 機器への電源供給、ガスや冷却水等の供給の配管等やメンテナンス用のステージ及び高所作業の安全確保のための安全柵が、5 階、3 階、1 階に設置されている。本機器も高所や狭隘な場所に設置されるため、作業用足場や安全ネット等の安全対策を施した。写真9に高所作業であるステージ撤去の際の安全柵を示す。



③ ヤグラ支柱切断、ヤグラの搬出、貫通孔部の配管閉止

・配管用ヤグラ部はヤグラの3階部にある4本の支柱と8本のプレス及び建屋からの2本の連結支柱を切断することによって、2分割した。

・支柱は直径が300mmの鉄製およびSUS製の中空配管であり、写真10中に示す切断機を使用して、切断した。耐震性、バランス(平衡度)、安全性、作業性を十分に検討し、支柱、プレス、建屋連結支柱の切断順序を決定して切断した。切断した支柱には、簡易的な固定治具を取付けて、切断後のヤグラのブレを防止する工夫をした。写真10にヤグラ支柱切断作業、写真11にヤグラプレス切断作業を示す。

・最後の支柱を切断した後、ヤグラを吊上げ、直立のまま天井走行クレーンで組立室へ移動した。その後、トレーラーへ積み込むために、組み立て室でヤグラを横倒しにした。4m x 4 m x 7 m, 重量10トンのヤグラを横倒しするために、天井クレーンの主巻と補巻を使用し、ヤグラ上部側と下部側それぞれにチェーンブロックを付替え、ゆっくりとヤグラ上部側と下部側のバランスをとりながら配管用ヤグラ部を横倒した。横倒し中にはヤグラの上部側と下部側の両端にロープをつなぎ、ヤグラの振れを抑制した。写真12にヤグラ吊出し、写真13にヤグラ横倒し中の作業を示す。分割した残り半分の配管用ヤグラ部も同様な手順で別棟の放射線管理区域へ搬出した。

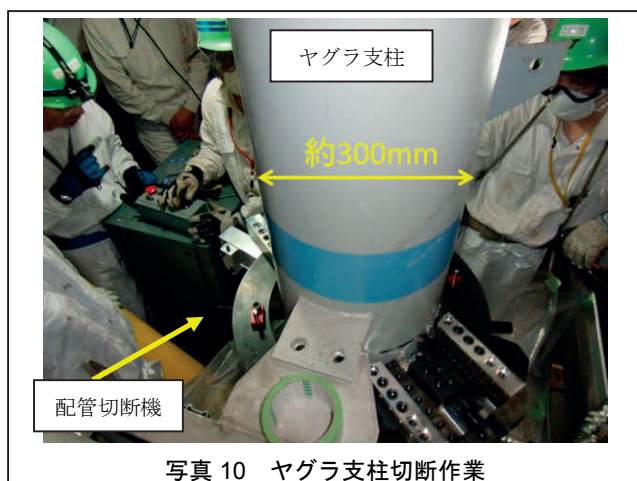


写真10 ヤグラ支柱切断作業



写真11 ヤグラプレス切断作業

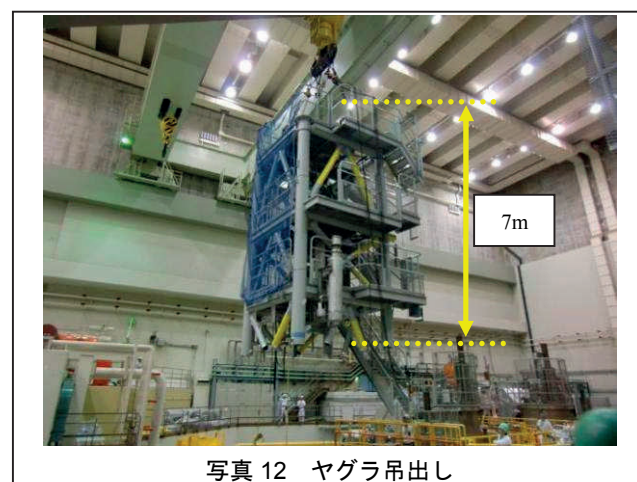


写真12 ヤグラ吊出し

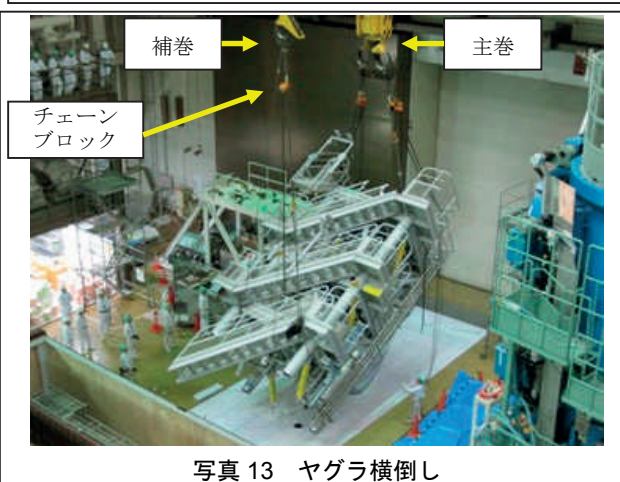


写真13 ヤグラ横倒し

④ グリーンハウス内での切断作業

・別棟の管理区域へ運び出された配管用ヤグラ部は、幅10000×15800×高さ7000mmのグリーンハウス内で、プラズマ切断機により、保管容器に収納可能な大きさ(12000mm x 2400mm x 2500mm)に細断された。写真14にヤグラ運搬、写真15にグリーンハウス内に搬入、写真16に保管容器収納の作業を示す。

・グリーンハウス内の作業は、作業前に排風設備とダストサンプリング装置が起動し、グリーンハウス内が常時負

圧状態に維持されていることを確認してから作業を開始した。

- ・グリーンハウス内での作業の際には、内被ばく防止のために、管理区域作業着の上にタイベックスーツ、半面マスク、皮手袋、ゴーグル、安全靴を着用した。図 17 にグリーンハウス内でのプラズマ切断作業を示す。
- ・グリーンハウスから退出する場合の放射線管理は、退出毎に、作業員に切粉や溶断片の付着が無いことを目視とサーベイメータで身体汚染検査を実施した。
- ・細断後の部品を持ち出す際のグリーンハウス開放前には、同ハウス内の清掃を行い、スミア採取し汚染検査を実施して、汚染の無いことを確認してからグリーンハウスを開放した。
- ・作業中にグリーンハウスの排風機が予期せずに停止した場合には、直ちに切断作業を中断し、適切な安全処置を施すとともに除染を施した後、速やかにグリーンハウス外に退出することを取り決め、作業を進めた。幸いにも、作業中に、上記の不具合は発生することにはなかった。



写真 14 ヤグラ運搬作業

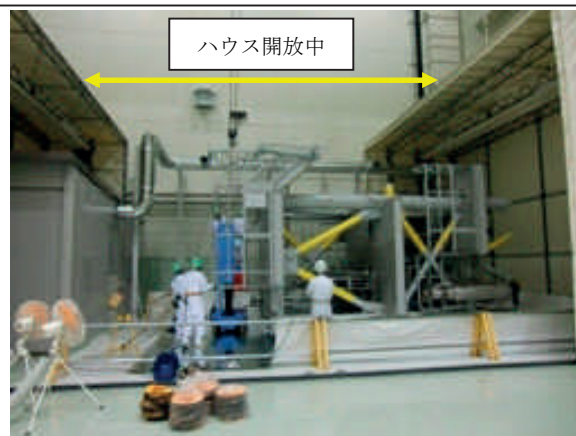


写真 15 グリーンハウス内への搬入作業



写真 16 保管容器収納作業



写真 17 プラズマ切断作業

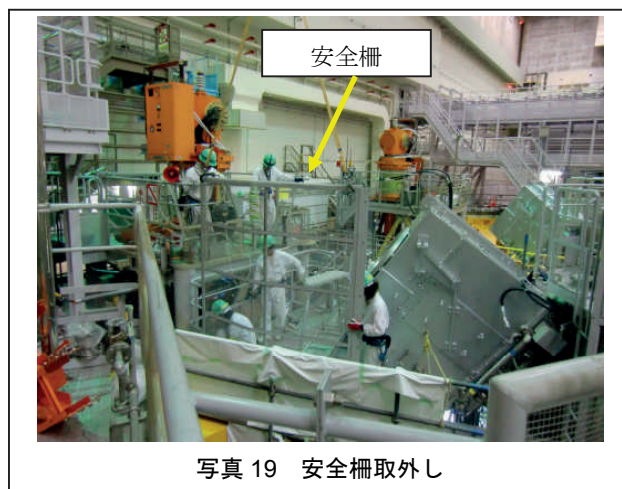
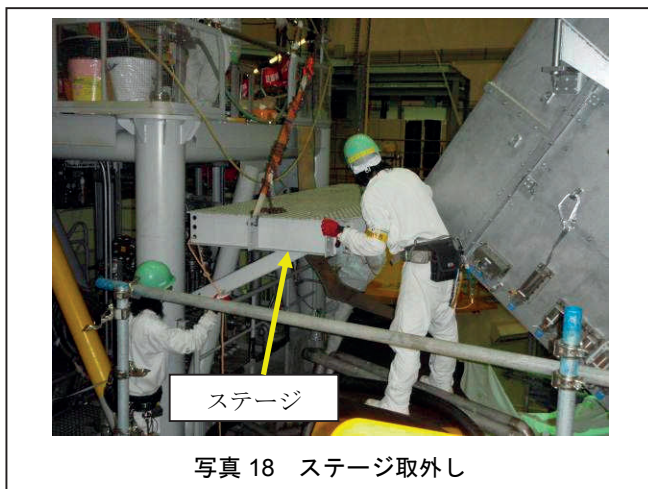
⑤ 解体品の切断作業、保管作業・密閉容器への収納

- ・グリーンハウス内で細断品は切断面において発錆の可能性のある金属に対しては、金属テープや塗装による防錆処置を行った後に、保管容器に収納した。保管容器への収納は、機器ごとに管理タグを取付け、管理台帳に必要情報を記入し（放射線測定結果含む）収納した。

(3) P-NBI #2,#4,#6,#14 5 階ステージの解体

- ・5 階ステージは配管用ヤグラから上ユニットのイオン源へアクセスするステージであり、ステージ下部には冷却水配管、ホース、電源ケーブル等が固定されており、ステージ周りには落下防止の安全柵が設置されている。
- ・本ステージは総重量 4 トンであり、地上から約 13m の高所に設置されている。このステージの解体にあたっては、下部の 3 階ステージより作業足場を組立てて、周囲に安全ネット等の安全処置を実施してから作業を行った。

・ #2,#4,#6,#14 の 4 ユニット用のステージは JT-60SA でも再使用するため、機器の機能を損なうことなく解体作業を実施し、別棟の放射線管理区域内へ運搬し、そこで保管した。写真 18 にステージ取外し、写真 19 に安全柵取外しの作業を示す。



5. NBI 加熱装置の解体作業の今後の予定

表 1 に示すように、今後 2011 年 2 月から 2012 年 1 月の予定で残りの NBI 加熱装置の解体作業を実施する。

2011 年 2 月より大型構造物である垂直 P-NBI 上ユニットから解体を実施する。垂直 P-NBI 上ユニットの #6 と #12 の解体が終了した後に、接線 P-NBI の入射ダクトを撤去する必要がある。これは、この入射ダクトが接線 P-NBI ユニットの隣に位置する垂直 P-NBI 上下ユニットの主排気タンク(#5,#6,#11,#12)よりサポートされており、入射ダクトを撤去しないと垂直 P-NBI 主排気タンク(#5,#11)が解体できないためである。

次に垂直 P-NBI 下ユニットと N-NBI 入射ダクト及び同サポートヤグラを平行して、解体する。最後に接線 P-NBI ユニットの解体作業を実施し全解体作業を完了する。

6. まとめ

日本原子力研究開発機構において、日本で最初に、核融合装置の解体作業を進めている。現在、装置中心の本体真空容器の周辺機器である中性粒子入射装置を中心に作業を進めている。これまでに、N-NBI の超大型構造物である HVT、P-NBI の #11/#12 配管用ヤグラの撤去、5 階ステージの撤去等の解体を実施した。今後、主排気タンクの解体作業を 2011 年 2 月に開始し、2012 年 1 月を目標に完了する予定である。