

超高電圧応用に挑戦した1/3世紀

-核融合炉用中性粒子ビーム入射装置技術の進展-

2018年12月14日

(株)日立製作所 ヘルスケアビジネスユニット

核融合・加速器部

河上 浩幸

Contents

1. ITER-NBTFの実績と近況

- ・概要 ・現地状況 ・耐電圧試験
- ・課題克服 圧力容器、絶縁確保、電位固定

2. NBIの開発、製作の経緯

- ・開発、製作の経緯 ・JT-60用NBI ・LHD用NBI

3. ビーム技術の応用展開

- ・ミリング装置 ・スパッタ装置 ・酸素イオン注入装置
- ・粒子線がん治療装置

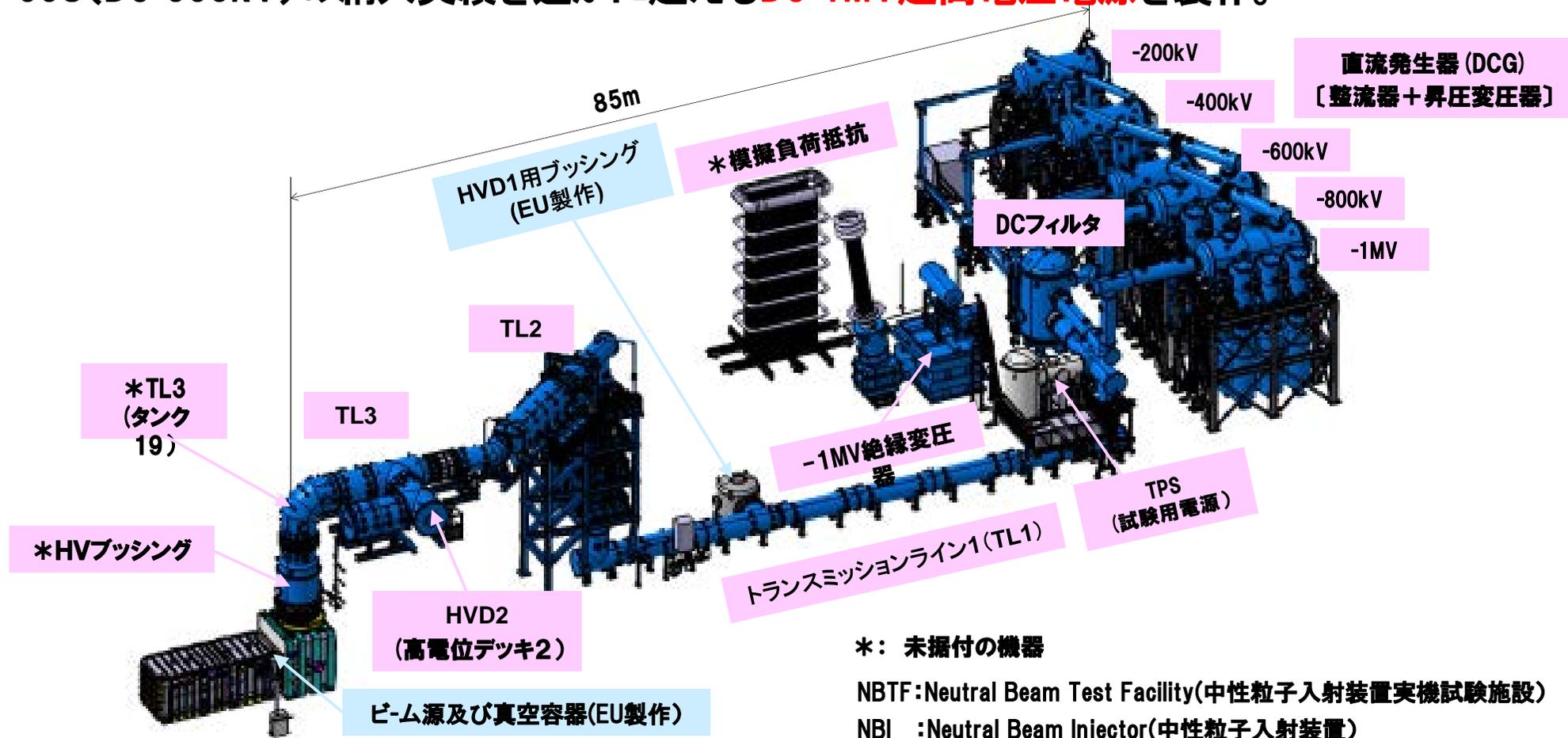
4. まとめ

1. ITER-NBTFの実績と近況 (1) 概要

ITER用NBI(中性粒子入射装置)では、DC-1MV超高電圧電源を用いて負イオンを加速し、1MeV、40A、1時間の負イオンビームを発生させる。

ITERに先駆けてビーム加速技術の実証を目的として、イタリア・パドバにNBTFが建設中。直流発生器以降の高電圧部主要機器(桃色)を日本が担当する。

JT-60U(DC-500kV)の納入実績を遥かに超える**DC-1MV超高電圧電源**を製作。



NBTF(中性粒子入射装置実機試験施設)用 超高電圧電源(日本担当部分)
(イタリアのパドバ RFX研に設置)

1. ITER-NBTfの実績と近況 (2) 現地状況

2012年に受注、約5年かけて計16台の機器製作を完遂。

現地据付は、DCG～トランスミッションライン3のタンク18迄は据付が完了、耐電圧試験を開始。



【TL2のタンク3(コアスナバ部)】



【絶縁変圧器の高電圧ブッシング部】



【DCフィルター、DCG、接続管】



【TL2の垂直タンク部及び架台】



【TL1のタンク(地下ピット設置)】



【TL1のタンク(地下ピット入口)】

1. ITER-NBTFの実績と近況 (3) 耐電圧試験

RFX研にてITERの他機器に先駆け、受け入れ試験を開始した。

TPS (試験用電源)を使用した耐電圧試験を2回実施し、合格した。今後、3回実施予定。

①第1回目 (9/12~13) DCフィルタ~直流発生器 (DCG)1-5

・耐電試験電圧の内容

DC-1200kVで1時間、DC-1060kVで5時間、DC-1060~-1265kVの繰り返し試験 (5回)

②第2回目 (11/12) トランスミッションライン1~2~3、HVD2 (高電位デッキ2)

・耐電試験電圧の内容

DC-1200kVで1時間



2回目の耐電圧試験実施メンバー



2回目の耐電圧試験時

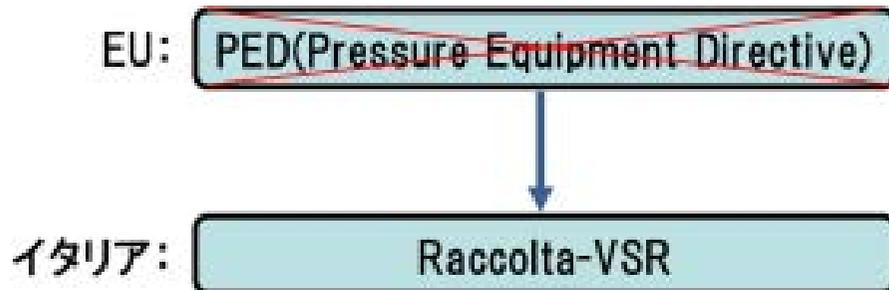
1. ITER-NBTFの実績と近況 (4) 課題克服 ① 圧力容器

■イタリアの規格 Raccolta-VSRが適用。

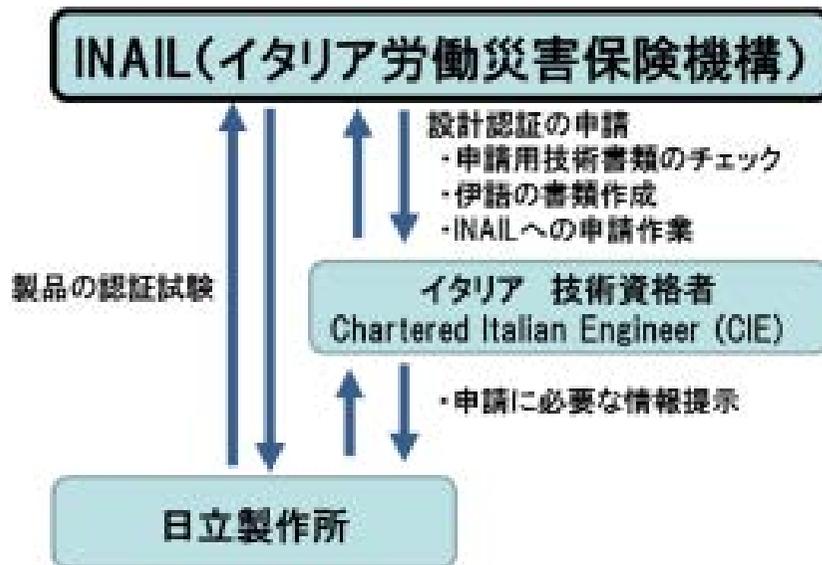
独特の申請手順で、樹脂製容器の再設計も要。

◇圧力容器指令(PED)が適用除外、
イタリアのRaccolta-VSRを適用

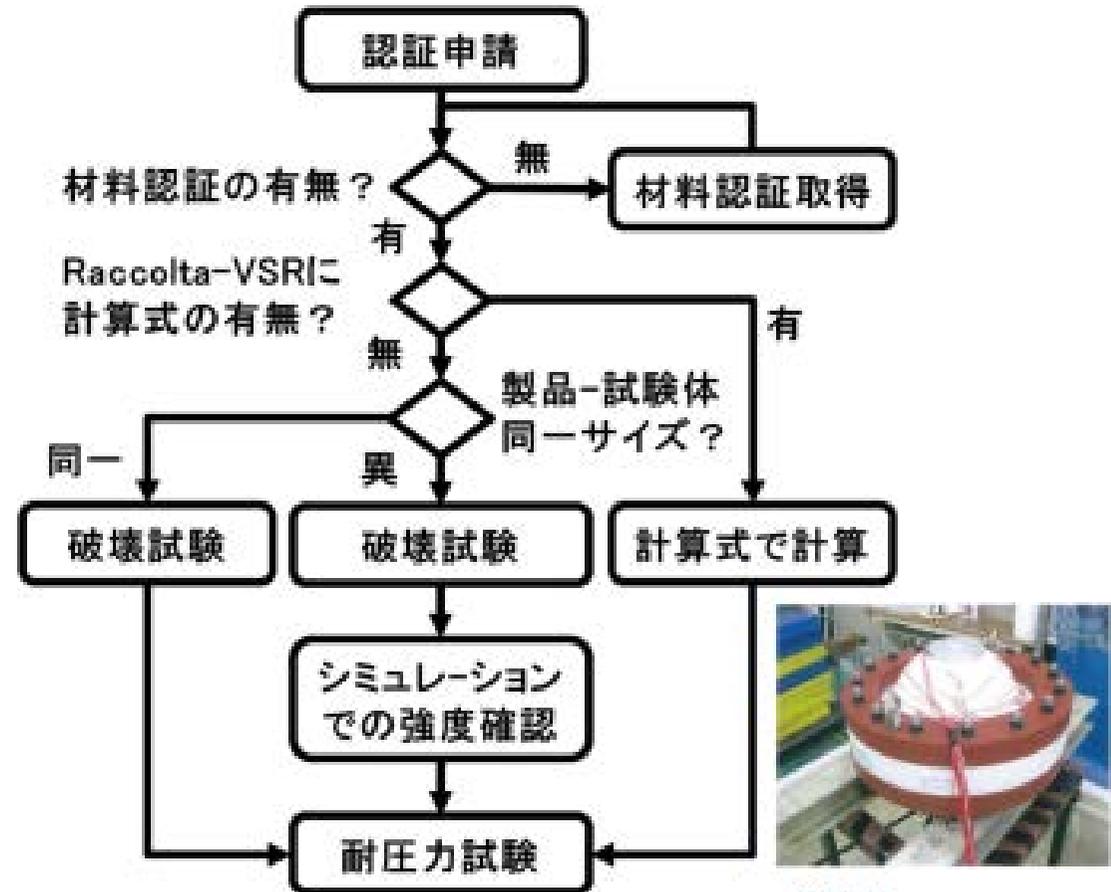
◇認証申請の流れ



◇Raccolta-VSRの申請関係



・INAILへの設計認証の申請はCIEのみ。



樹脂部品の破壊試験

- ・計算式の無い樹脂やベローズは破壊試験が必要。
- ・破壊試験の試験圧力は、計算式で算出するが、設計圧の5~6倍になる場合もあり、再設計が必要であった。

1. ITER-NBTFの実績と近況 (4) 課題克服 ②絶縁確保

■電界集中を見逃し、DCフィルタにて絶縁破壊が発生

- ・機能：整流後の電圧リップルの低減
- ・構造：限定された空間に200～1000kV電位の抵抗やコンデンサ等の多数の部品を搭載

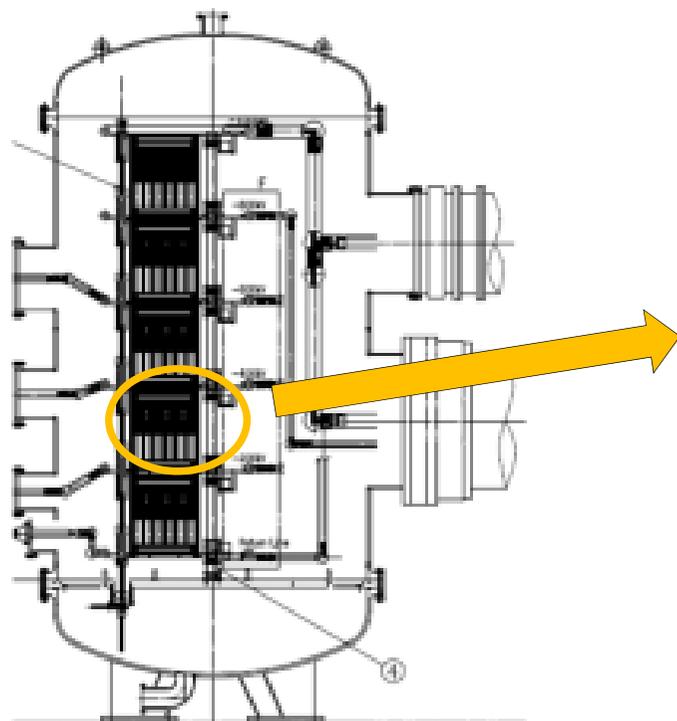


図1 CRユニットの絶縁破壊箇所(電位はユニット1段で記載)

- ◇原因：放電端は、並列抵抗の電極(0V電位：ユニット電位)に取付けられたワッシャのエッジ。当該ワッシャ(M4)は外径 ϕ 10mmと小径であり電界集中度が高く、加えてナット最外径(ϕ 8.1mm)より突出している為、過度な電界集中が発生。
- ◇対策：ワッシャエッジ部の電界集中を解消する為、ボルト材質を樹脂(PEEK材)に変更(対象列)。直列抵抗のボルトも同様に、樹脂に変更。

2. NBIの開発、製作の経緯(1)

日立は1978年にJT-60原型ユニットの詳細設計を始めとし、ヘリオトロンE、JT-60、LHD用NBIを製作、2017年のNBTF用NBIの納入に至る。

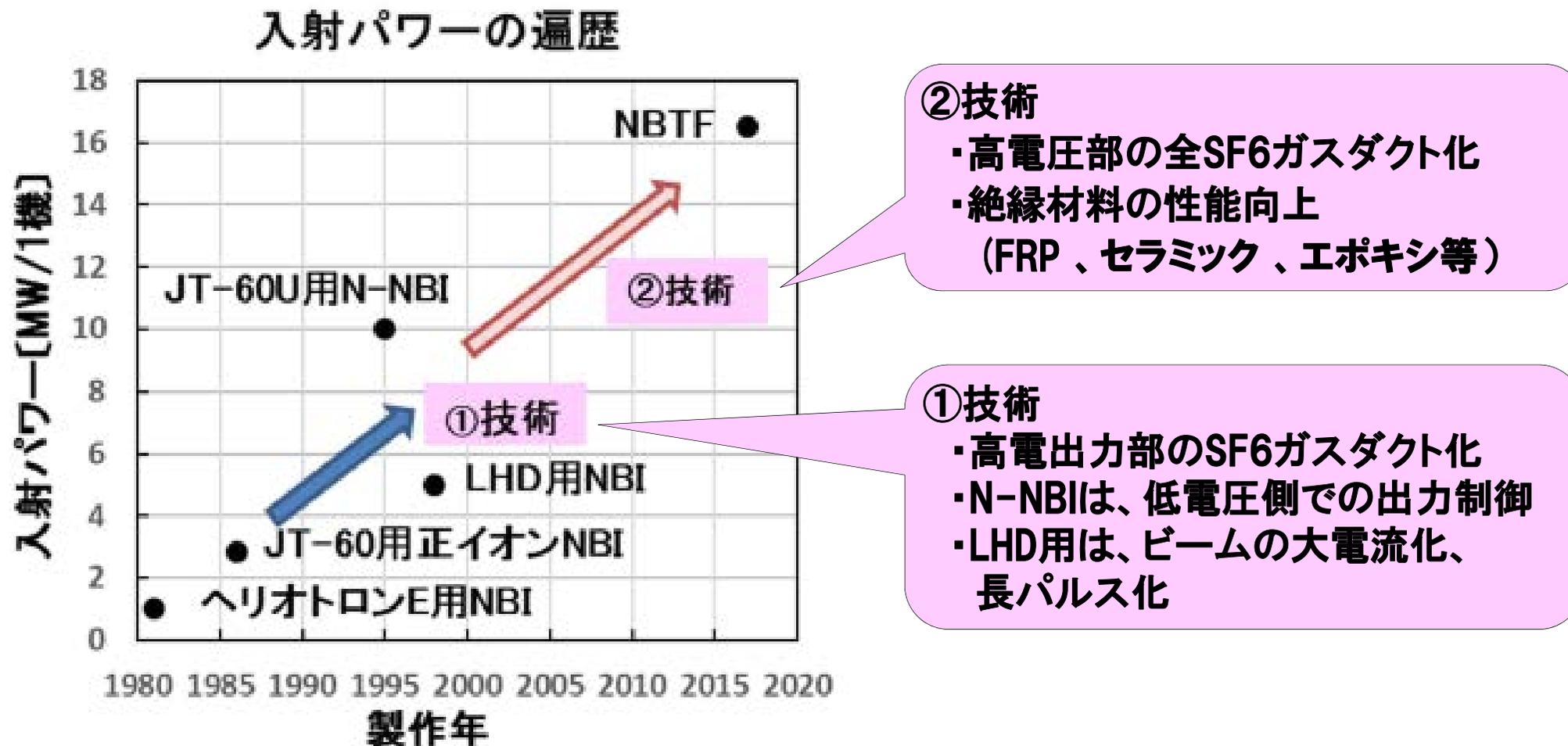
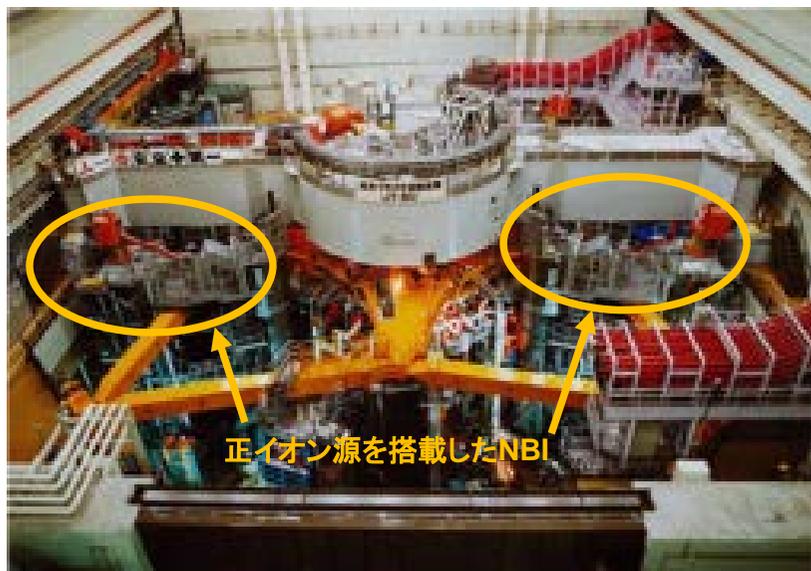


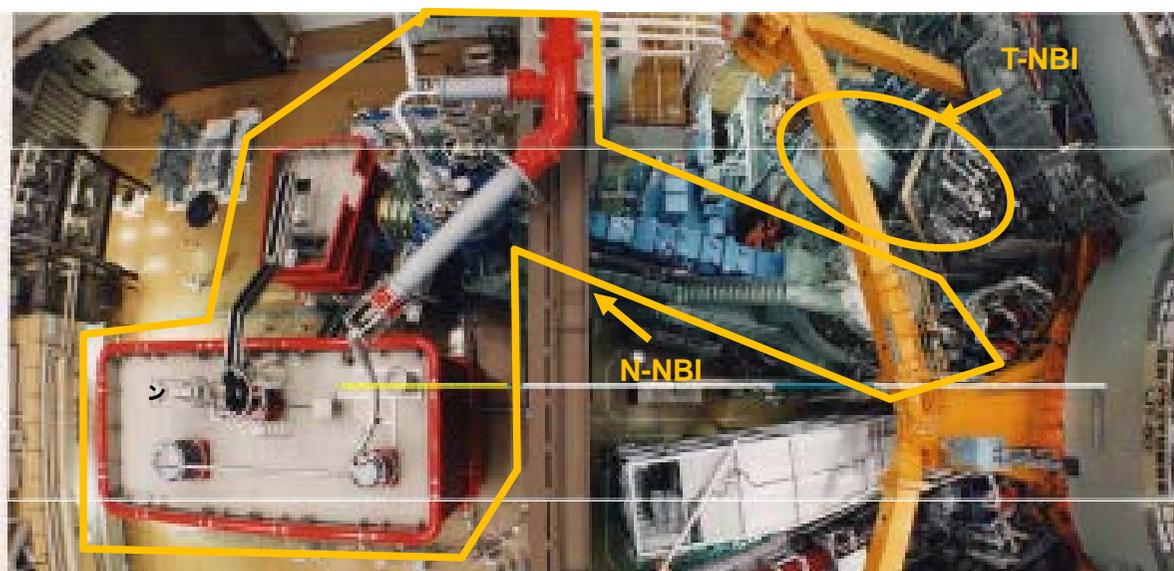
図 NBIの入射パワー遍歴(設計時)

2. NBIの開発、製作の経緯 (2)JT-60用NBI

- JT-60用として、1986年に正イオン源を搭載したNBIを14機、1992年にT-NBIを2機納入
- JT-60U用として、1995年に負イオン源を搭載したN-NBIを1機納入



正イオン源を搭載したNBIの外観



T-NBI及びN-NBIの外観

■ N-NBIの主な仕様(設計時)

- ・ビームエネルギー : 500 keV
- ・入射エネルギー : 10 MW
(1ビームライン当たり)
- ・イオン種 : H⁺ / D⁻
- ・イオン源数 : 2台
(1ビームライン当たり)

負イオン源

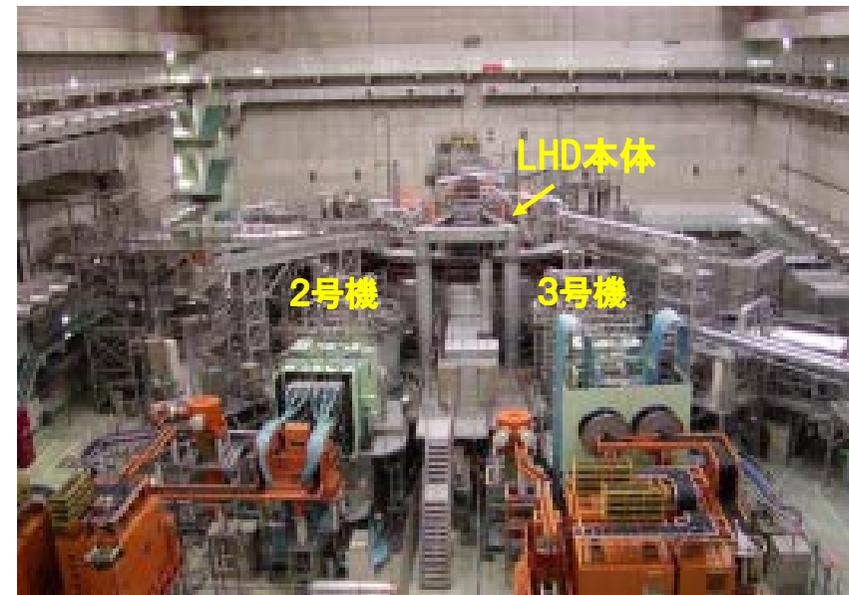


N-NBIのビームラインの外観

* 写真は量子科学技術研究開発機構殿より御提供

2. NBIの開発、製作の経緯 (3)LHD用NBI

- LHD用として、1998年に負イオン源を搭載したNBIの2号機、2001年に3号機を納入
- LHD用として、2005年に正イオン源を搭載したNBIの4号機、2010年に5号機を納入



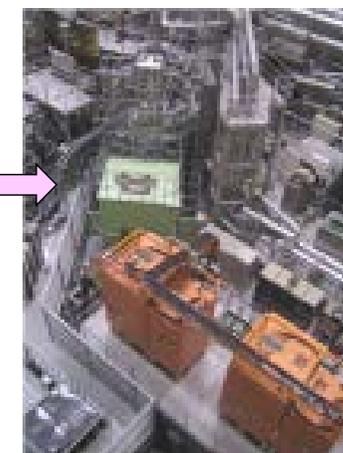
LHD用 NBI2号機及び3号機の外観

■ LHD用負イオン源NBIの主な仕様(設計時)

- ・ビームエネルギー : 180 keV
- ・入射エネルギー : 5MW(H)
(1ビームライン当たり)
- ・イオン種 : H⁺ / D⁻
- ・イオン源数 : 2台
(1ビームライン当たり)



LHD用負イオン源



LHD用のNBI4号機の外観

3.ビーム技術の応用展開 (1) イオンビームミリング装置

〔特徴:大口径(φ580mm)バケット型イオン源、磁気ヘッドの製造装置用〕

■イオンビームミリングの原理

大口径バケット型イオン源からイオンビームを基板に打ち込み、基板の粒子を叩き出して基板を削る。

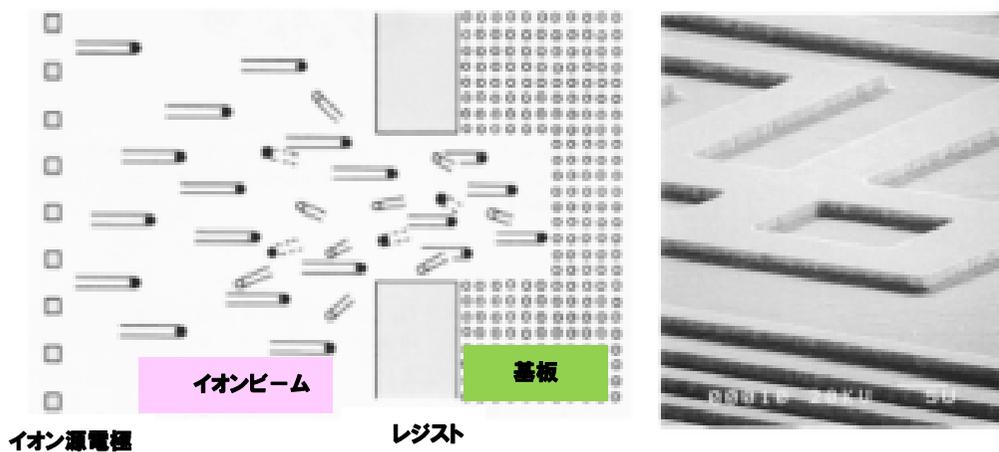
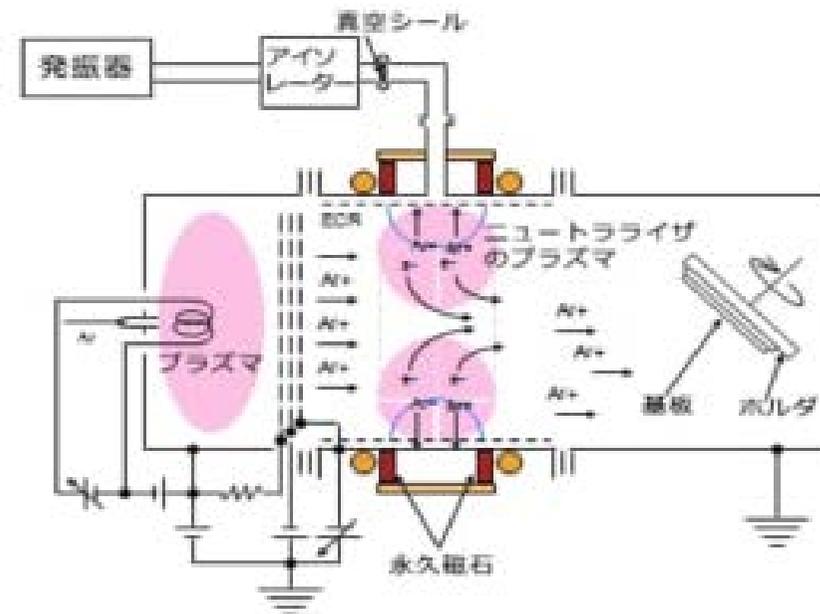


図 イオンビームミリングの原理

ミリングの加工例

■イオンビームミリング装置の構成



■大口径バケット型イオン



バケット型イオン源の外観

主な仕様

- ・電極サイズ : φ580mm
- ・電極孔 : マルチアパーチャ型
- ・ビーム発散角 : 5° 以下
- ・ビーム電流 : 1mA/cm²以上
- ・使用ガス : Ar、CF₄など

■イオンビームミリング装置の外観

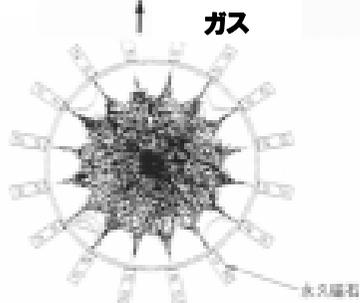
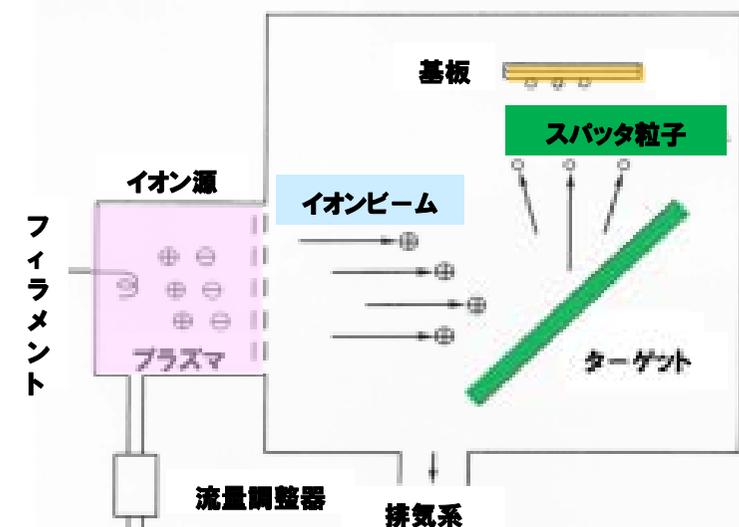


3. ビーム技術の応用展開 (2) イオンビームスパッタ装置

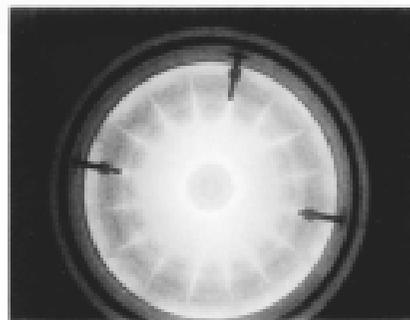
〔特徴: 複合機能のスパッタ装置、研究成膜装置用〕

■イオンビームスパッタの原理

バケット型イオン源から引き出したイオンビームを、ターゲットに打ち込み、ターゲットでスパッタされた粒子が基板に付着する。

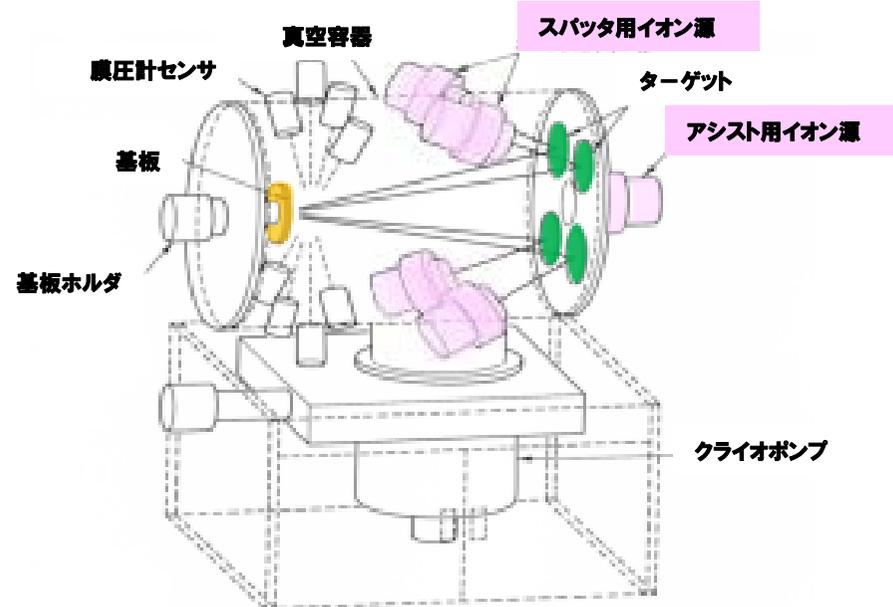


バケット型イオン源の電子跡シミュレーション

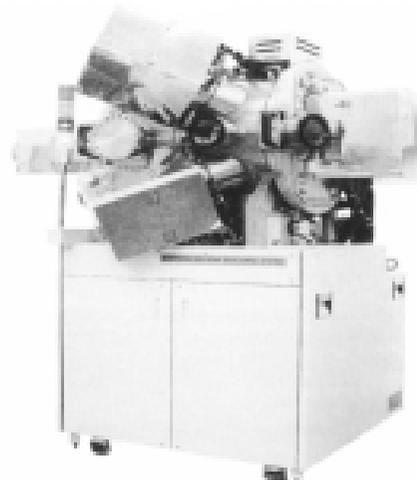


バケット型イオン源で形成されたプラズマ

■多元同時イオンビームスパッタ装置の構成



■多元同時イオンビームスパッタ装置の外観及び主な仕様



- ・スパッタイオン源: 4台、バケット型1.2kVx100mA
- ・アシストイオン源: 1台、バケット型100V~1.2kV
- ・ターゲットサイズ: ϕ 6インチx4枚
- ・基板サイズ : ϕ 3インチx1枚
- ・膜圧均一性 : \pm 2%以下

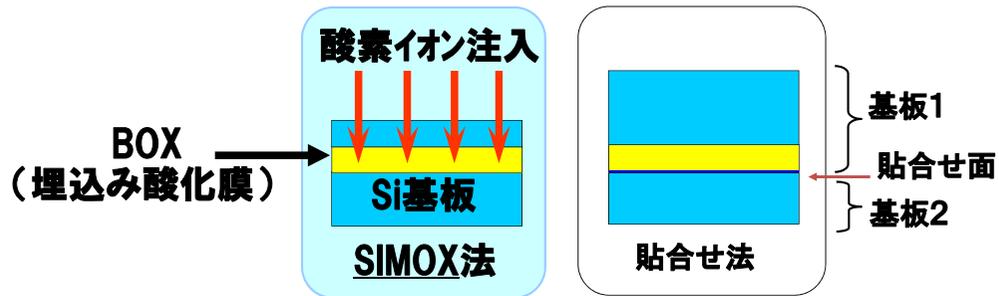
3.ビーム技術の応用展開 (3) SIMOXウェーハ用酸素イオン注入装置

〔特徴:大電流(Max100mA)の酸素イオンビーム、半導体ウェーハ製造用〕

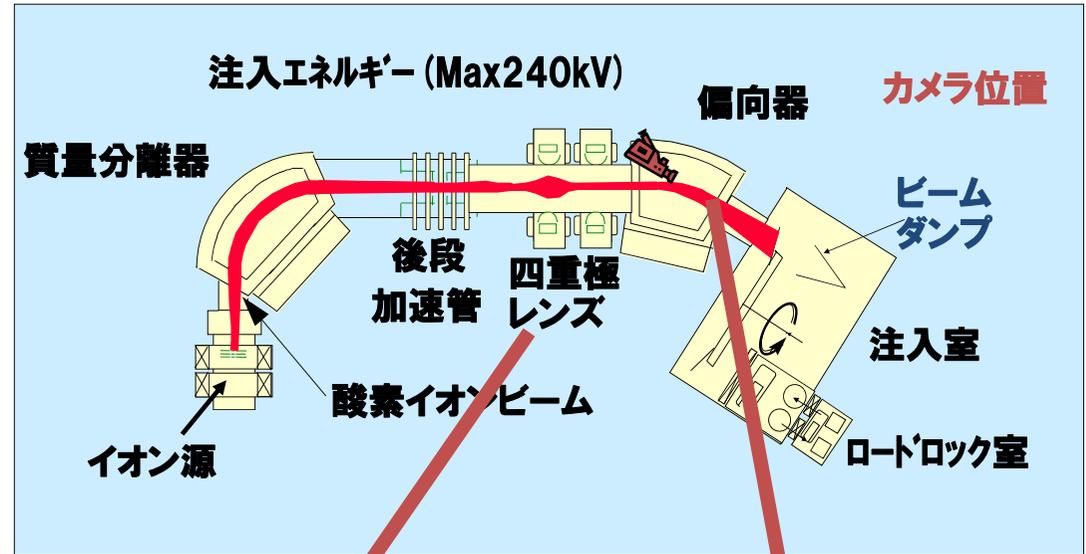
■ SOIウェーハの作製法 SOI: Silicon on Insulator

■ 酸素イオン注入装置の構成

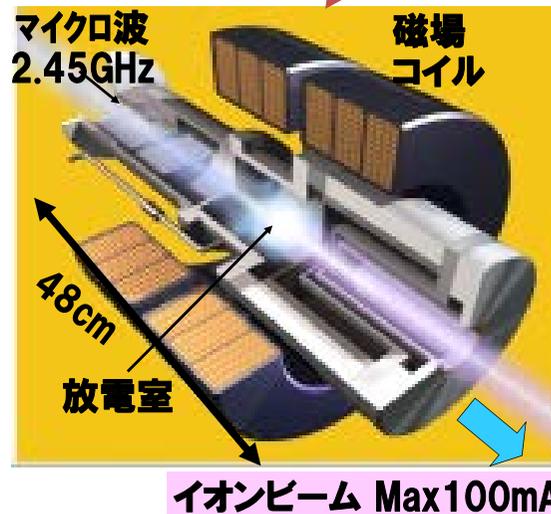
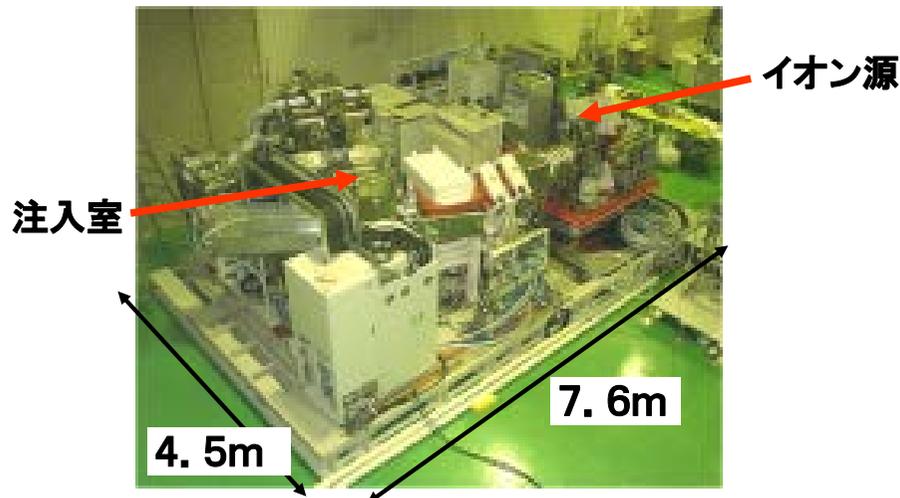
LSIの高速化、低消費電力化が目的



SIMOX: Separation by Implanted Oxigen



■ 酸素イオン注入装置の外観



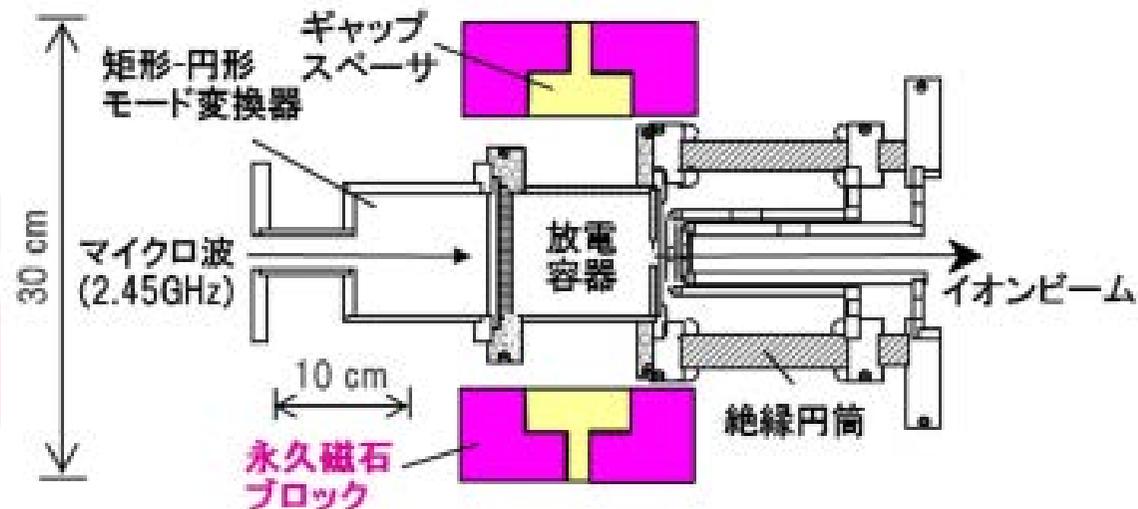
3.ビーム技術の応用展開 (4) 粒子線がん治療装置

〔特徴:メンテが容易な高信頼性イオン源、医療用〕

■ 粒子線がん治療装置(PBT)は、電磁応用機器及び大型科学プラントとして、核融合実験装置との共通点が多い。



■ PBT用イオン源の構成



■ PBT用イオン源の外観及び主な仕様



主な仕様

- 孔径: 5mm
- プラズマ電極: 30 kV
- 減速電極: -2 kV
- 接地電極: 0 kV
- 最大電流: 63 mA
- パルス幅: 400 μs
- 繰り返し周波数: 20 Hz
- マイクロ波電力: 1.3 kW



PBTの全体構成

* 上記図は名古屋陽子線治療センターHPより転載

4. まとめ

(1) NBTFの現地据付工事及び耐電圧試験の進展

RFX研殿とQST殿の協働により、現地据付工事及び耐電圧試験は順調に進んでいる。日立はTA (テクニカルアドバイザー) を派遣し、据付工事、耐電圧試験を助勢。

(2) NBIの開発、製作の実績及びITER計画への展開

1978年のJT-60用原型ユニットの詳細設計を始めとして、ヘリオトロンE用、JT-60原型ユニット用、JT-60用、JT-60U用 (T-NBI、N-NBI)、LHD用 (2~5号機)、ITER用NBTFと30年以上にわたり、開発、製作を実施。

(3) ビーム技術の応用展開

NBI装置開発から派生したイオン源を主体としたビーム技術を産業用装置へ展開。

⇒日立は、今後も核融合開発に貢献していきます。



Innovating Healthcare, Embracing the Future

HITACHI
Inspire the Next