

# LHD における 20 バレル固体水素ペレット入射装置の設計・組立

○林 浩己<sup>A)</sup>、坂本隆一<sup>B)</sup>、本島巖<sup>B)</sup>、吉藤均<sup>A)</sup>、新出順士<sup>A)</sup>、山田弘司<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>核融合科学研究所 技術部 装置技術課

<sup>B)</sup>核融合科学研究所 大型ヘリカル研究部 プラズマ制御研究系

## 概要

核融合科学研究所では、LHD と呼ばれる実験装置で超伝導コイル磁場によるプラズマの閉じ込め実験を平成 10 年 3 月から行っている。ペレット入射装置は、高温のプラズマに燃料としての水素ガスを氷の固体ペレットにしてプラズマ内部に供給する装置である。平成 20 年月上旬に研究教育職員（以下：研究者）から、20 バレル固体水素ペレット入射装置（以下 20 連発ペレット入射装置と呼ぶ）の設計及び組立てを手伝ってほしいとの依頼があった。それは、技術部装置技術課が、LHD のプラズマ真空容器内の管理・維持を行っていて、真空技術・設計技術・設置技術・組立技術・測量技術が蓄積されているからである。我々は、LHD の管理・維持の業務が優先されることから技術職員ですべての設計・組立てを請け負うことは難しかったが、依頼した研究者も組み立てに時間の許す限り協力するとのことだったので請負うこととし、研究者 2 名・技術職員 3 名の 5 人体制で進めることになった。本報告では、20 連発ペレット入射装置（ハード）の設計と組立ての過程について報告する。制御系（ソフト）についても、既に技術部制御技術課にて、10 連発ペレット入射装置で開発してきた実績があることから引き続いて 20 連発ペレット入射装置の制御も開発することになった。

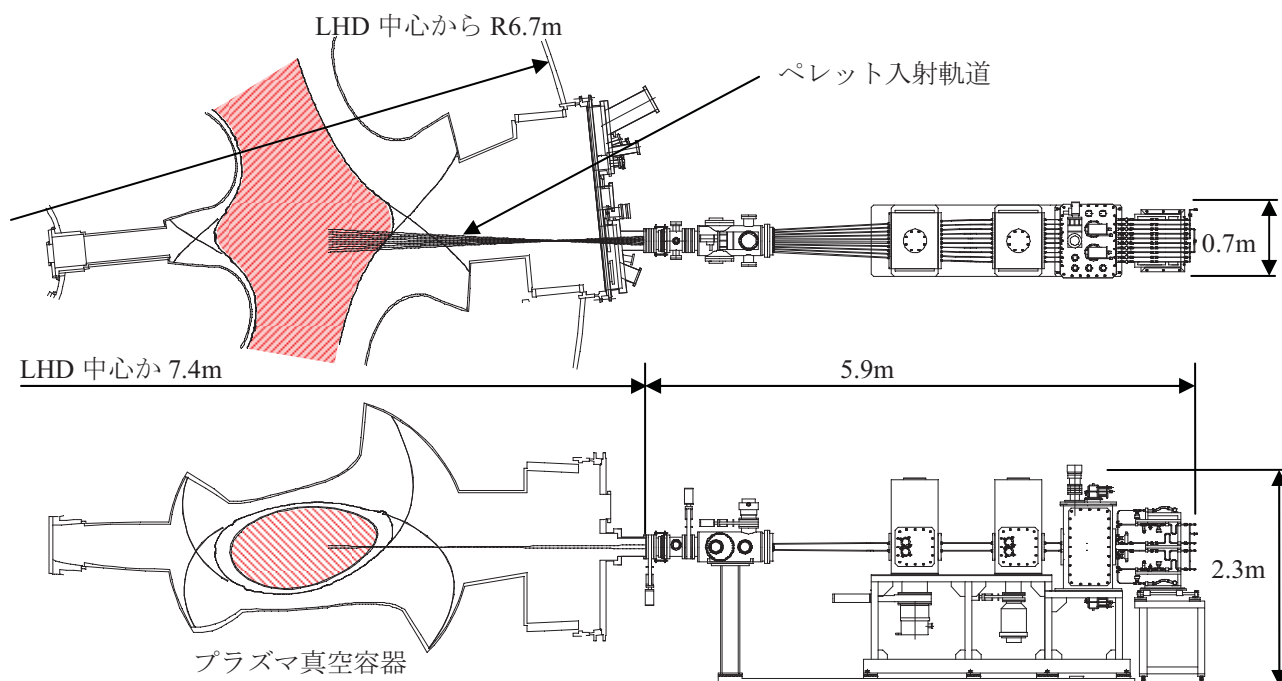


図 1. 20 バレル固体水素ペレット入射装置

## 1 開発の経緯

ペレット入射装置は、LHD プラズマ実験開始当初（平成 10 年）から 12 サイクル実験（平成 21 年）まで、

研究者が改良しながら 10 連発ペレット入射装置で実験を行っていた。しかし近年 LHD プラズマの高性能化により、プラズマ中に燃料となる固体水素ペレットが 10 発以上必要となった。そこで、我々は、20 連発ペレット入射装置を開発し、平成 21 年 13 サイクルからプラズマ実験に使用した。その 20 連発ペレット入射装置を開発するに至っては、新たな場所に現状の 10 連発ペレット入射装置と同じ装置を設置する案と、新しく 20 連発ペレット入射装置を開発し 10 連発ペレット入射装置と入替る案とで議論された。10 連発ペレット入射装置を新たに設置するスペースが無いことや 2 基の 10 連発ペレット入射装置を少人数で管理・実験対応することは難しいと判断し、20 連発ペレット入射装置を新たに開発し 10 連発ペレット入射装置と入れ替える方向で進めることになった。職員（研究者・技術職員）で 20 連発ペレット入射装置を開発することになった理由として、LHD 実験予算の削減によるペレット製作予算が削られたことやメーカーに依存することなく職員で修理・改良が自由にできることであった。10 連発ペレット入射装置と同じように 20 連発ペレット入射装置の設計・製作・組立を全てメーカーに一括発注すると数億円単位で予算が必要となる。またメーカーによる故障時の修理や改造作業には、多額な予算も必要で迅速に修理・改良もできない。よって職員で設計・組立てをすることにより少予算で高性能なペレット入射装置の完成を目標に開発に取り組んだ。10 連発ペレット入射装置の撤去から測量・設計・組立・リーク試験・入射テストすべてをおこなって完成させた。

## 2 ペレットの概要

ペレット入射装置とそれのプラズマ実験への役割を説明する。最初に水素ガスを絶対温度 10K 以下まで冷却し氷の固体水素ペレット（以下ペレットと呼ぶ）を生成する。そのペレットを加圧ヘリウムガスで、空気銃の原理で弾丸のように高温プラズマに打ち込む。打ち込まれたペレットは高温のプラズマ内部で溶けて、水素が内部に直接供給される。水素ガスをプラズマ表面に吹きかける通常の方法よりもとても高い密度のプラズマを実現できプラズマの性能を上げることができるのである。

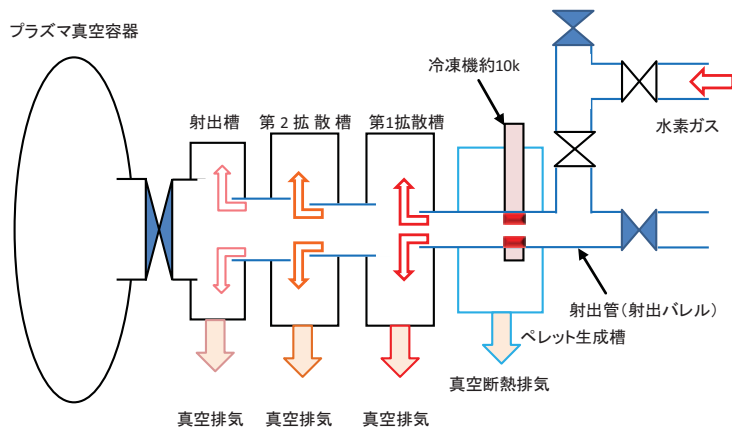


図 2. 固体水素ペレット生成

ペレット入射装置は、図 2 に示すように、ガス供給系バルブ架台 (図 6)、生成槽、2つの拡散槽、射出槽の 5つのブロックに分けられる。ペレットをプラズマ中に打ち込むまでの工程を 1 バレルを例に説明する。図 2 中の真空断熱容器の生成槽でペレットを生成するところから始まる。ガスを供給する系統から、水素ガスを射出管と呼ばれる配管内に供給すると、冷凍機により絶対温度 10K 以下まで冷却された配管の内側の一部に、水素の氷の固体が成長し配管が詰まった状態で生成される。射出管の内径サイズにもよるが、図 3 に示すように射出配管内に  $\phi 3.4\text{mm} \times \text{H}3.4\text{mm}$  や  $\phi 3.8\text{mm} \times \text{H}3.8\text{mm}$  の二種類の円柱状の固体水素ペレットができる。次にペレットを生成する際に使用した水素ガスの残留分を外部へ排気する。ここまでの工程を約 2 分で行う。次に図 4 に示すように、射出管内に生成されたペレットは、プラズマが放電されると LHD 中央制御からの入射信号に合わせて高速電磁バルブを作動させ、約 4MPa で加圧されたヘリウムガスで空気銃のように押し出され加速させる。約 1200m/s まで加速されたペレットは、射出バレルの先端から第 1

るが、図 3 に示すように射出配管内に  $\phi 3.4\text{mm} \times \text{H}3.4\text{mm}$  や  $\phi 3.8\text{mm} \times \text{H}3.8\text{mm}$  の二種類の円柱状の固体水素ペレットができる。次にペレットを生成する際に使用した水素ガスの残留分を外部へ排気する。ここまでの工程を約 2 分で行う。次に図 4 に示すように、射出管内に生成されたペレットは、プラズマが放電されると LHD 中央制御からの入射信号に合わせて高速電磁バルブを作動させ、約 4MPa で加圧されたヘリウムガスで空気銃のように押し出され加速させる。約 1200m/s まで加速されたペレットは、射出バレルの先端から第 1

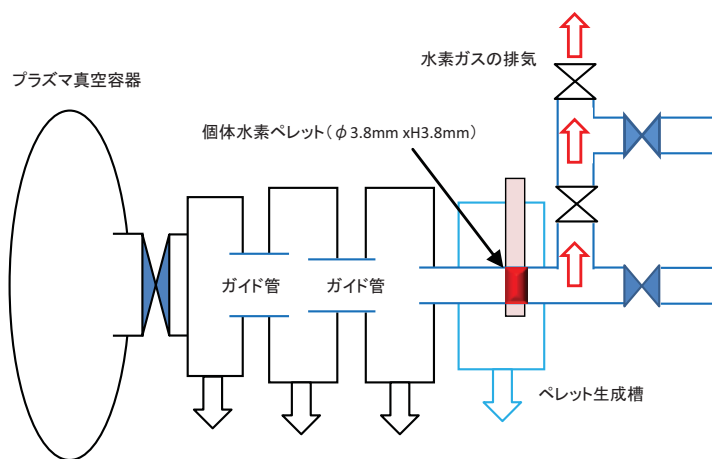


図3. 残留水素ガスの排気

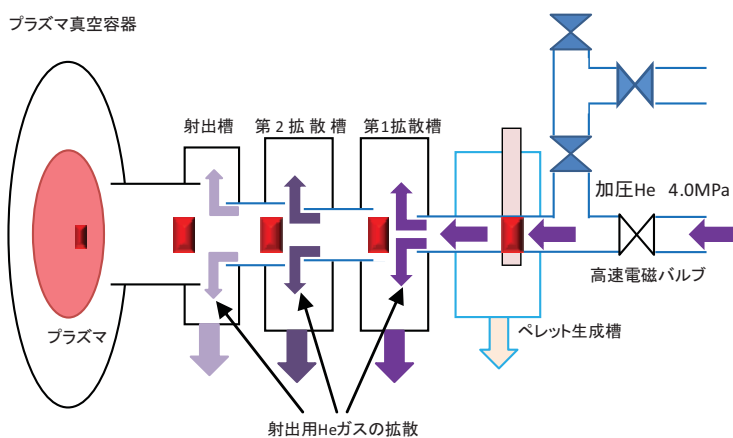


図4. ペレットの射出と射出ガスの拡散

拡散槽へ飛び出し、飛び出したペレットは、プラズマ中へ正確な位置に打ち込むためのガイド管に入る。この第1拡散槽（約300L）で射出用ヘリウムガスを拡散させ、作動排気により取り除き処理を行う。ガイド管に入ったペレットは、第2拡散槽（約300L）で再び射出されガイド管に入る。第1拡散槽と同様に第2拡散槽で、2回目の射出用ヘリウムガスの取り除き処理を行う。最後は射出槽でペレットが射出され、プラズマ中心へと打ち込まれる。最終射出層でも作動排気を行うことにより、まだ残っているヘリウムを取り除く処理を行う。この射出用ヘリウムガスを取り除かないでプラズマ中にペレットを射出すると、大量のヘリウムガスも一緒にプラズマ真空容器内に入り、プラズマ実験に影響を及ぼす。このことから射出用ヘリウムガスをできるだけ取り除く必要があり、射出管を出たペレットの射出ガスは、2つのガイド管を通過することで3つの拡散槽（1つは射出槽）により取り除

かれるシステムになっている。それらの真空チャンバーの作動排気システムによって、プラズマ真空容器内に注入するヘリウムガスを水素ペレットに含まれる粒子数の1/1000以下にすることができる。この一連のペレットが生成されて射出されるまでの工程を20バレル分3分周期で繰り返しプラズマ実験に対応する。

### 3 設計・組立てにおける役割分担

図5にペレット入射装置の設計・組立の工程を示す。平成20年3月から基本設計を行い、平成21年2月に10連発ペレット入射装置を撤去し、測量・組立を開始した。完成は、21年8月を目標とし制御系を組込み9月に試験、10月から実験に使用した。ペレット入射装置を組み立てるに至っては、研究者と技術職員で役割分担し業務を遂行した。ペレット入射装置の仕様・システム設計・予算管理は、実験担当としての研究者が行った。技術職員は、それらの部品が組み立てられる様に、組立図面と製作図面を作成し部品の製作依頼を業者や製作技術課に行った。現場の溶接についても所内作業として、製作技術課に行ってもらった。10連発ペレットの撤去作業・組立・制御系のケーブル布設に関しては、お互い研究者と技術職員の時間を調整しながら行い、リーク試験・射出試験も共同で行った。ペレット入射装置の組立てにおいて、専門業者でないと施工できない箇所は、地元の業者（低価格）に依頼し、床面の補強溶接・電気ケーブルとラックの布設・粗挽き用真空排気配管の布設を行ってもらった。制御系の作業は、制御技術課が担当し、制御系の物品の発注・盤内配線・ソフトプログラミング・射出タイミング用制御回路・プラント監視画面の開発をした。

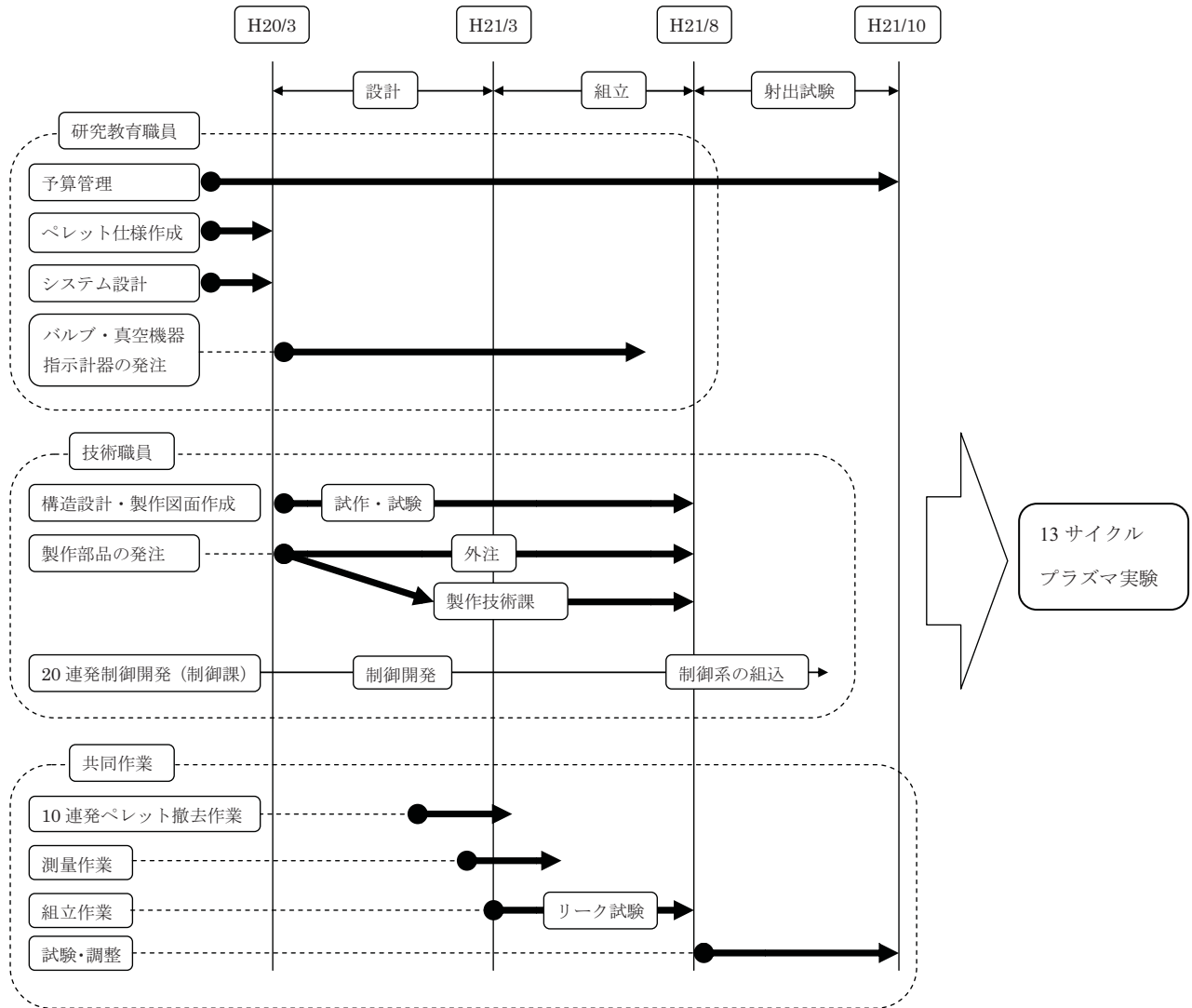


図5. ペレット入射装置の設計・組立の工程

## 4 ペレット入射装置の開発する上での必要な技術

### 4.1 真空技術

LHDに取り付ける条件として、 $1.0 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下の感度で尚且つそのヘリウムリーク検出器で検出されないことである。本装置の設計は、超高真空仕様であり、新規で考案した設計部分については、試作品を製作しリーク試験を行い問題ないことを確認しながら設計した。また組立て時は、完成部品ごとにリーク試験を行い、リークがないことを確認しながら順序よく組立てた。

### 4.2 製作図面作成技術

CADを利用した製作図面の作成技術が必要であった。図6に20バレル固体水素ペレット入射装置組立図と製作用部品図の一部を示す。機械工作部品図と溶接部品図は、工作メーカーや製作技術課と相談しながら加工方法を検討し最適化して作成した。また機械工作部品については、NCへ移行可能な電子ファイルで受け渡し、部品の製作を依頼した。





#### 4.3 組立て及び測量技術

プラズマ中へ設計通りの正確な位置にペレットを入射できるよう、床のベンチマークから±2mm以内（ペレット中心軸）、高さレベルについては±0.5mm以内で設置することができた。測量に関しては、レーザー水準器、トランシット、Yレベル等の測定器を使用した。

### 5 20連発ペレット入射装置の設計条件

#### 5.1 10連発ペレット入射装置の設置スペース内で20連発ペレット入射装置を設計すること。

10連発ペレット入射装置のサイズ以下で設計するのが条件であった。尚且つ保守作業も行い易くするため作業スペースも確保する。20個のバレルの配置を調整し、バルブのメンテナンスもできるよう必要最小限のスペースを確保し設計した。

#### 5.2 コスト削減

図面に関しては、組立概念図ではなく、そのままNCにデータを移行すれば加工可能なCAD図面を作成した。工作メーカーの図面作成費用を抑えることができた。またNIFSの技術部製作技術課に製作可能な部品はすべて依頼した。アルミの電子ビーム溶接が比較的容易になったことから拡散槽などアルミ材料で製作することで加工しやすくなりコスト削減につながった。

#### 5.3 フランジの軽量化（アルミ材料化）

10連発ペレット入射装置は、メンテナンス用開口部のフランジは全てステンレスであったため重く、クレーン作業を必要とし取り扱いも不便であった。組立・保守作業を重視した設計から、フランジをアルミ化することで対応した。しかしフランジをアルミ化したことにより、ステンレス部品（ガイド管）と真空取り合いの設計部分で、既製品を利用して設計することが難しくなった。設計案をいろいろ考え、特注品などは、製作技術課で加工することによりコストを下げる工夫をした。またアルミ材料を使用することで加工が容易となり、作業中のOリングが落下しないような蟻溝加工を施すなど複雑な加工も盛り込むことができた。

#### 5.4 20連発による射出用ヘリウムガス量の軽減対策と射出速度について

ペレットを打ち込むためのガスヘリウムは可能な限り少ない方がいい。高速電磁バルブから水素の氷が生成される間の距離を可能な限り短く（体積減らす）するよう設計を行った。そうすることにより、加速圧力を下げることができガス量を減らせることができるからである。ペレット射出速度と圧力の関係・ペレットの射出速度と射出管の長さの関係などANSYSを利用した解析も行い設計の最適化を行った。

## 6 まとめ

平成21年13サイクルプラズマ実験では、20個全てのバレルからペレットをプラズマ中に設計値通りに入射することができた。12サイクルプラズマ実験までは、10発までのペレットで、1ショットのプラズマ放電中にプラズマの密度を高密度にすることはできたが、その密度を高密度のまま維持する実験ができなかった。13サイクルから20発までペレットが入射可能になったことから、高密度に維持できる実験が可能になり多く実験データが得られた。技術部として多くの実験データを得られたことには、当然喜ばしいことであるが、13サイクルプラズマ実験当初から20連発ペレット入射装置が運転できたこと（期限通り）が成果だと思っている。我々装置技術課では、LHDの運転・維持管理も行っており100%ペレットの設計と組立てに従事できなかったが期限までに完成することができた。今後も予算削減の影響を受けて、研究者から設計・製作・制御の開発依頼が多くなることが予想される。技術部として責任をもってこのような装置の設計・組立てに

取り組んでいきたいと思う。新しい装置を開発することは、技術者としての技術力アップや完成後の満足感も得られることから今後も総合的に研究者を支援したいと思っている。

最後に図7にLHDに組み込まれた20バレル固体水素ペレット入射装置の配置画像を掲載する。

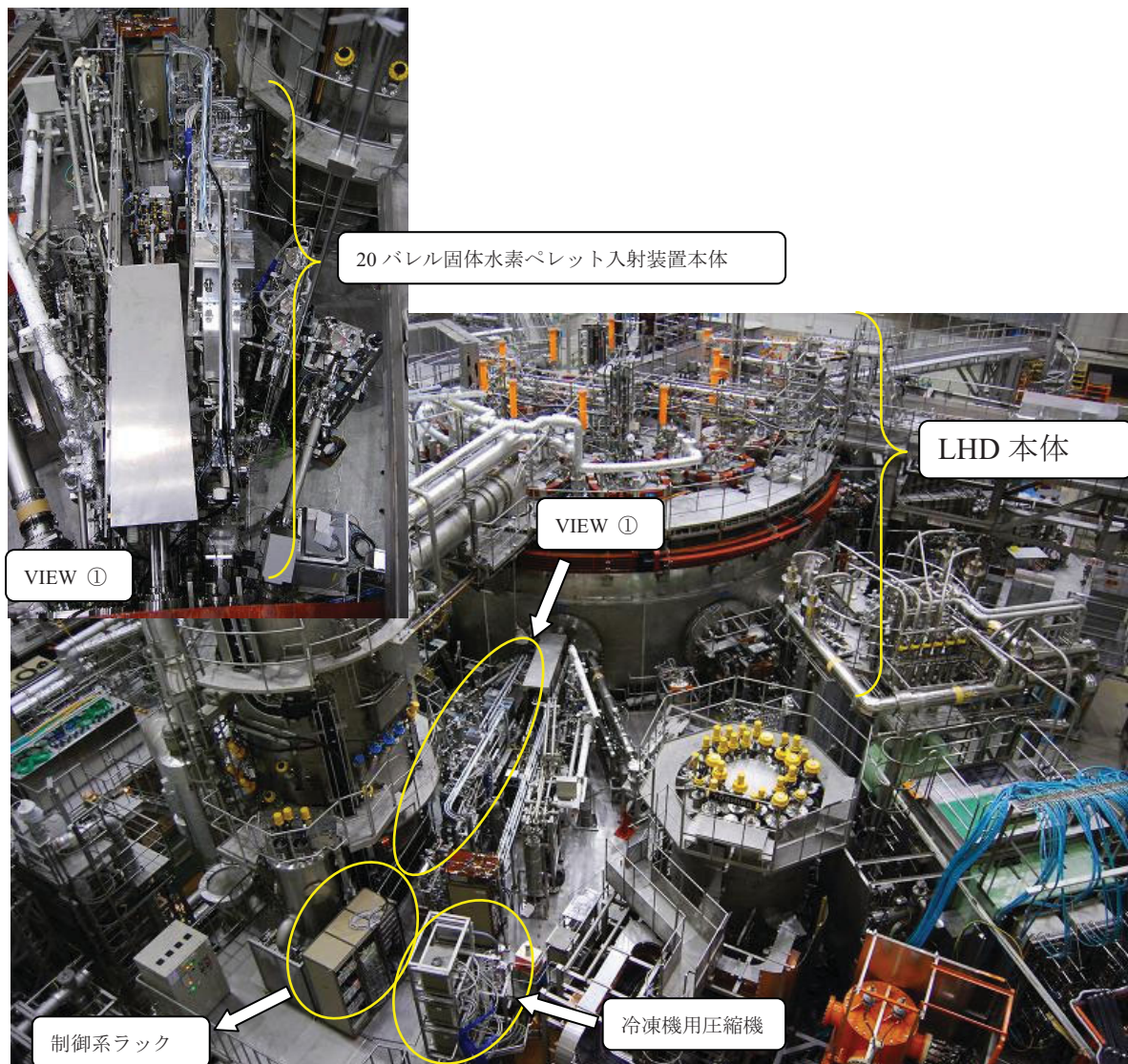


図7. LHD と 20 バレル固体水素ペレット入射装置本体