

講座 核融合炉の炉内機器の構造を理解する

1. 真空容器の構造を理解する

小野塚正紀, 中平昌隆¹⁾

三菱重工業株式会社, ¹⁾ 日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2006年1月25日)

核融合装置にてプラズマの閉じ込めに要する真空を維持するため要する真空容器について, 必要となる機能, その機能を満たすために要求される条件, 構造上の概念などを例示し, 解説するとともに, 真空容器の設計に要する構造規格について概要を紹介する. また, 真空容器に関する一般的な設計の進め方を例示するとともに, 現在建設が推進されている ITER の真空容器の構造設計例を紹介する.

Keywords:

vacuum vessel, ultra high vacuum, confinement of radioactive, materials, one-turn electric resistance, in-vessel component support, electromagnetic force support, neutron shield, toroidal ripple, structural standard and code

1. 真空容器の構造を理解する

本講座第1回では, 主として重水素 - 三重水素 (D-T) 燃焼を扱うトカマク型核融合装置にて使われる真空容器について, まず必要とされる機能を取り上げ, その機能を満たすために要求される条件, 構造上の概念などを例示し, 解説する. また, 真空容器を設計する上で必要となる構造規格および一般的な設計の進め方を紹介するとともに, 現在建設が推進されている ITER (国際熱核融合実験炉) での真空容器の設計を紹介する.

1.1 真空容器の機能

核融合装置においては, プラズマの閉じ込めに要する真空を維持するため, 真空容器が必須となる. また, 真空容器は放射性物質である三重水素 (トリチウム) を閉じ込めるための安全障壁でもあり, 高い信頼性が要求される. 真空容器に要求される主な機能は次のとおりである.

- (1) プラズマの燃焼に必要な超高真空の生成と維持
- (2) 放射性物質の閉じ込め
- (3) ブランケット・ダイバータ等の容器内機器の支持
- (4) プラズマ消滅時などに発生する電磁力の支持
- (5) 超伝導コイルへの放射線遮蔽
- (6) プラズマ電流立ち上げに要する高い一周電気抵抗の確保
- (7) プラズマ垂直安定性の確保
- (8) 高温ベーキング加熱
- (9) 核発熱の除去
- (10) 磁性材の挿入によるトロイダル磁場のリップル低減

1.2 機能を満たすための条件

上述した機能を満たすために真空容器に要求される技術

要件を以下に示す.

1.2.1 超高真空の生成と維持

核融合プラズマは, 原子番号の最も小さな水素同位体 (重水素および三重水素) を燃料とし, 空気密度の10万分の1程度の希薄な密度に保持される. このため, 核融合装置のプラズマを生成するには 10^{-5} Pa 以下の超高真空が必要である. さらに, 燃料より大きな原子番号を有する元素が不純物として少しでも混入すると放射冷却などによりプラズマの温度が低下し, プラズマは消滅してしまうため, プラズマを生成・保持するにはクリーンな超高真空を維持する必要がある.

核融合装置で要求される 10^{-5} Pa レベルの真空度は, 半導体などを製造する際に要求されるレベルであるものの, 核融合装置での真空容器は容積が大きく, 例えば ITER では約 $1,000 \text{ m}^3$ の容積^[1]が必要であり, この容積を超高真空に維持するのは容易ではない.

真空容器内の真空度 (P) は, 放出ガス量 (Q) と真空排気速度 (S) でバランス ($P = Q/S$) する. したがって, 超高真空を維持するには, 真空排気設備による排気を行うものの, 容器内表面から放出されるガス量を低下させる必要がある. Table 1 にその方法を例示する. 排気速度 (S) は, 適用する排気設備の排気速度 (S_p) によるものの, 排気設備までの配管などにおけるコンダクタンス (S_c) にも支配される ($1/S = 1/S_p + 1/S_c$). 通常, 排気設備には高真空領域での排気速度を確保できるターボ分子ポンプやクライオポンプが適用されるが, ターボ分子ポンプの場合には磁場中でのロータ回転, またクライオポンプではクライオパネル上の誘導渦電流による発熱などへの対策が必要となる. また, コンダクタンス確保には排気設備までの距離を短くすると

Comprehending the Structure of a Vacuum Vessel and In-Vessel Components of Fusion Machines

1. Comprehending the Vacuum Vessel Structure

ONOZUKA Masanori and NAKAHIRA Masataka

author's e-mail: masanori_onozuka@mhi.co.jp, nakahira.masataka@jaea.go.jp

Table 1 超高真空生成と維持の方法例

目的	方法	概要
効率的な真空排気	排気設備	高真空領域での排気速度を確保できるターボ分子ポンプやクライオポンプを利用。
	排気管コンダクタンス	短い排気管および大口径ポートの確保。
放出ガス低減	表面処理	表面研磨などによる実効表面積の低減。
	表面洗浄	脱脂洗浄などによる不純物除去。
	高温ベーキング	容器内真空排気しつつ100℃以上の高温に加熱し、材料表面に吸着した不純物を追い出す。
	放電洗浄	放電にて希釈プラズマを生成し、プラズマ粒子を材料表面に叩きつけることにより表面に吸着された不純物を叩き出す。

Table 2 真空容器への負荷電磁力の原因となる誘起電流の例

代表的な電磁力	渦電流誘起の概要
プラズマ電流立ち上げ時	プラズマ電流立ち上げ時に、ポロイダル磁場コイル電流の急激な変化により誘起される渦電流。
定位置ディスラプション (センターディスラプションなど)	プラズマの定位置消滅時に伴う急激なプラズマ電流の時間的变化により誘起される渦電流。容器内機器からの反力ともなる。
移動ディスラプション (VDE など)	プラズマが移動しながら消滅する際に伴うプラズマ電流の時間的および空間的变化により誘起される渦電流。容器内機器からの反力ともなる。
超伝導トロイダル磁場コイルの高速電流消滅	超伝導コイルの異常時対策として通電電流の高速開放に伴う電流の時間的变化により誘起される渦電流 (特に真空容器内周側に高電流密度の電流が誘導される)。

ともに、大口径の排気ポートが必要となる。

真空容器内を超高真空に維持するために放出ガス量 (Q) の低減が不可欠であるが、真空容器表面に吸着した水分や材料の中にしみ込んでいる各種ガス成分は、真空中にて放出されるだけでなく、プラズマからの光や粒子によっても叩き出される。これらの放出ガスはプラズマにとり不純物となるため、抑制する必要がある。実際、ITERにおいては、真空容器および容器内機器の表面積が5,000 m²を越えると予想され、この大表面からの脱ガス抑制は重要である。この手法として、真空容器内表面の「表面脱脂洗浄」をはじめ、プラズマ運転前に容器内を真空排気しつつ100℃以上の高温に加熱し、数時間から数日間維持することにより、材料表面に吸着した不純物をガスおよび蒸気として追い出す「高温ベーキング」や、グロー放電や弱電離放電などで希薄なプラズマを作り、プラズマの粒子を材料表面に叩きつけることにより表面に吸着された不純物を叩き出す「放電洗浄」が挙げられる。また、ガス放出する実質表面積を低減させるため、表面を極力研磨するなどの工夫も必要な場合がある。

1.2.2 放射性物質の閉じ込め

真空容器は燃料となる放射性物質の三重水素を閉じ込める安全障壁となる。三重水素以外にもプラズマ運転により発生する高速中性子の照射を受け、材料が放射化する。特に、運転中にプラズマから熱・粒子負荷を受けるプラズマ対向壁は、エロージョンなどの損傷・損耗が起り、放射化したダストとして容器内に残る。したがって、上述した超高真空の維持に必要な構造であるとともに、真空容器の外部にこれらの放射性物質が漏れない工夫が必要であり、また高い信頼性が要求される。特に、容器内機器であるブランケットやダイバータなどに使われる冷却系の冷媒などが漏れた場合、冷媒の圧力に加え、プラズマの有する熱エネルギーにより冷媒が加熱・加圧されることが懸念される。特に、冷媒が水の場合には、真空容器内にて水が蒸

気化・気化し高い圧力を発生する。したがって、真空容器は容器内真空の状態だけでなく、容器内が加圧される状態でも健全にバウンダリーとして確保される必要がある。また、真空容器のバウンダリーには、特に三重水素が透過することのないような材料と構造の選定が必要となる。例えば、有機系材料を真空シールに適用するのは避ける必要がある。

1.2.3 容器内機器の支持と電磁力の支持

トカマク型核融合装置では、真空容器および容器内機器などの金属製構造物中には、磁場の時間的および空間的变化に伴い渦電流 (I) が誘起され、周辺磁場 (B) との相互作用にて電磁力 ($F = I \times B$) が構造物中に発生する。Table 2 に誘起される電磁力の原因となる誘起電流を例示する。プラズマ起動時には、ポロイダル磁場コイルの電流を急激に変化させてプラズマ電流を立ち上げ、プラズマ電流の維持のためにさらにコイル電流を変化させるため、プラズマ周辺の構造物中に渦電流が生じる。

さらに、プラズマ消滅時 (ディスラプション) や超伝導磁石の高速電流消滅 (クエンチ) などにより、真空容器および容器内機器には多大な電磁力がかかる。プラズマ消滅時には、プラズマ電流の時間的および空間的な変化により、容器などの材料にプラズマ電流に匹敵する電流が誘起される。プラズマ消滅には、プラズマが定位置にて消滅する定位置ディスラプションおよびプラズマが移動しながら消滅する移動ディスラプション等がある。特に、上下方向にプラズマが移動しながら10 msec オーダの時間スケールにて消滅する垂直移動事象 (VDE: Vertical Displacement Event) は大きな電磁力荷重を真空容器に負荷するので、留意を要する。また、超伝導トロイダル磁場コイルを使う場合、クエンチなどの異常事象に対し、コイルから電流を急激に消滅させる場合、電流の過渡変化に起因し、真空容器に電流が誘起される。

容器内機器に誘起される電磁力は、容器内機器間の電気

的支持および荷重支持の方法などにもよるが、最終的には容器内機器を支持する真空容器に荷重として負荷される。したがって、真空容器はこれら容器内機器からの荷重と容器そのものに誘起される電磁力も考慮し、過度の変形が起こっても放射性物質の閉じ込め障壁そのものの損傷を招かないよう構造強度等に余裕を持ち設計する必要がある。

真空容器や容器内機器に流れる渦電流分布は、これら構造物の形状や配置、ポロイダル磁場コイルの配置や電流過渡履歴、ディスラプション条件などにより大きく異なり、かつ複雑である。特に、トーラス方向に対し、不均一・非軸対称となる構造を採用する場合、構造物に特殊な荷重を課すこととなるので、留意する必要がある。また、容器に取り付けられるポートは、容器表面に大きな開口部を設けるため、容器に誘起された電流は開口部を迂回する。このため、ポート付け根部には渦電流が集中するとともに、ポート自体にも電流が流れるため、ポート付け根部などの電磁力を注視する必要がある。

1.2.4 放射線遮蔽

核融合 DT 反応にて発生する 14 MeV のエネルギーを持つ高速中性子やそれによって誘導放射化される構造材料等からの放射線（主にガンマ線）の遮蔽も、真空容器においては重要な要求事項である。特に、容器外に位置する超伝導コイルでは、導体間および巻き線間に絶縁材が使われており、中性子照射により絶縁性能や機械的特性が劣化するため、容器内機器とともに真空容器により中性子を遮蔽し、コイルを保護することが必要である。また、運転後、真空容器外部での人的な点検・保守／補修作業を可能にするにも、誘導放射化した容器内機器からの遮蔽が重要となる。

Table 3 にこれらの放射線に対する遮蔽方法を示す。核融合装置での遮蔽には、高速中性子を散乱させエネルギーを減少させて熱中性子化させるために軽水などを利用し、

また発生した熱中性子を吸収させるために吸収断面積の大きな物質であるボロン（ホウ素）および軽水を利用する。また中性子捕獲反応過程にて放出されるガンマ線を遮蔽するために金属を利用し、必要な遮蔽性能を確保する。さらに、核融合装置としての使命を果たした後の廃棄処置においては、極力廃棄物の放射化レベルを抑えることが望まれる。特に、上述した遮蔽材を含む真空容器構造材は物量の多いため、これらの材料から長半減期元素となり得るコバルト、ニオブ、タンタルなどを極力除去するなどの工夫が必要である。

1.2.5 一周電気抵抗とプラズマ垂直安定性の確保

トカマクにおけるプラズマ立ち上げ時には、中心ソレノイドコイルの電流（一次側電流）を急激に変化させることにより、プラズマ中に電流（二次側電流）を発生させる。また、プラズマは有限の電気抵抗値をもつので、その中に電流を流すとオームの法則にて抵抗（ジュール）加熱される。しかし、二次側電流として流れる電流ループはプラズマに限らず、電流が流れる金属材料などの導体でできたループすべてに誘起される。このため、プラズマとともにトーラス状真空容器自身にもトーラス周方向への電流が誘起されることとなる。プラズマに効率的に電流を誘起させるには、真空容器に誘起されるループ電流を極力低減させる必要があり、真空容器トーラス周方向の一周電気抵抗をプラズマの電気抵抗値よりも大きくする必要がある。通常、プラズマより二桁以上高い一周電気抵抗値を確保する。

一周抵抗値は適用する材料の固有抵抗値に左右されるものの、構造を工夫することにて必要な抵抗値の確保が図れる。Table 4 に例を纏める。真空容器全体を薄肉の金属にて構成させ、抵抗を確保する方法では、必要となる構造強度は薄肉シェル板に補強リブなどを取り付け確保する方法がある。シェルを二重にし、シェル間にリブを設置させる二

Table 3 放射線遮蔽の方法例

必要となる遮蔽機能		代表的な遮蔽材料
遮蔽機能	概要	
高速中性子の熱中性子化	高速中性子を散乱させエネルギーを減少させて熱中性子化させる。	軽水 (ITER で採用)
熱中性子吸収	熱中性子を吸収させるために吸収断面積の大きな物質を利用。	軽水、ボロン（ホウ素） (ITER ではボロン添加ステンレス鋼を採用)
ガンマ線遮蔽	中性子捕獲反応過程にて放出されるガンマ線を遮蔽。	金属（ステンレス鋼など）
その他	廃棄物の放射化レベル抑制。	低誘導放射化材料、材料成分調整（長半減期元素などの除去）

Table 4 一周抵抗確保の方法例

方法		概要
高固有抵抗材料の採用		インコネル625などの高固有抵抗材料を適用
構造	薄肉シェル構造 (二重壁構造含む)	薄肉シェル板に補強リブなどを取り付け強度確保。比較的均一な電気抵抗構造を提供でき、JT-60U、DIII-D および ITER にて採用。
	ベローズ	ベローズを設け抵抗を確保。但し、電磁力に対するベローズの構造強度の確保要。JT-60、JET にて採用。
	電気絶縁物	セラミック、テフロンなどの電気絶縁物にて抵抗を確保。特に、ディスラプション時に誘起される渦電流によるせん断力への対応要。JFT-2M にてテフロン絶縁材を採用。

重壁構造の採用もあり、JT-60U(改造後)、JETやDIII-Dに採用されており、ITERでも採用が計画されている[1-3]。また、部分的に集中抵抗体を用いる方法としてベローズを設ける方法、またセラミック、テフロンなどの電気絶縁物を設ける方法も広く使われており、ベローズはJT-60(改造前)、JETにて、またテフロンはJFT-2Mなどに採用されている[3,4]。

トカマクのプラズマにおいては、プラズマの垂直安定性を確保することが課題の一つである。プラズマ制御コイルによるプラズマ位置制御とともに、真空容器をプラズマ形状に合わせてプラズマの受動的安定性を確保する。さらに、必要に応じて、特に容器上下部に電気伝導体を設置する。これらにより、プラズマが導体に近接した際に導体に誘起される電流により、プラズマそのものを導体と相反する中心部方向へ押し戻すことが可能となる。ただし、上述の一周電気抵抗との兼ね合いより、垂直安定化に要する導体は局所設置にする必要がある。また、導体に誘起される電流に起因する電磁力の支持も必要となる。

1.2.6 高温ベーキング加熱と核発熱の除去

前述したように、高温ベーキングは、材料そのものを加熱させ、脱ガスを行うため、加熱される表面すべてからの脱ガスが図れる。そのため、通常、運転初期においては、高温ベーキングが不可欠とされている。ベーキング温度は脱ガスを狙う成分にもよるが、少なくとも100℃以上にて水分の除去を積極的に行う必要がある。

真空容器はプラズマから直接または容器内機器を介して間接的に熱負荷を受ける。また、核融合反応の結果、中性子照射を受けて容器材料は放射化し崩壊熱を発生する。崩壊熱は運転停止後も一定期間発生する。このため、真空容器そのものを冷却する必要がある。冷却には軽水、ガスを適用することが考えられるが、上述した遮蔽性能の確保を合わせて、軽水を利用するのが効率的である。

1.2.7 トロイダル磁場リップルの低減

トカマク型装置においては、有限の数のトロイダル磁場コイルが作るトロイダル磁場は均一な磁場とはならず、コイルの配列に応じ、特に外周側（アウトボード側）では磁場にリップルと称する短波長の規則的な乱れ（コイル間での磁場の膨らみ）が生ずる。このリップルにより生じた磁場井戸に粒子が捕捉されることにより、エネルギー閉じ込め特性の劣化などを生じる。また、加熱入射中性粒子およびアルファ粒子の粒子損失およびエネルギー損失により、プラズマ対向機器への高熱負荷が懸念される。

このため、特に、大型トカマク型核融合装置にとってトロイダル磁場のリップルの低減は重要な課題のひとつである。リップルを低減させる方策をTable 5に示す。直接リップルを低減させるには、トロイダル磁場コイルの設置数を多く確保するのが望ましい。例えば、JETにおいては32式のコイルを採用し、リップルを1%に抑えている（コイル数16式ではリップル10%と評価）[3]。しかしながら、コイルの数を増やすことは、プラズマ加熱・計測および容器内へのアクセス性確保のために要するポートの大きさを制限することとなるとともに、建設コストを増加させる一因に

Table 5 リップル低減の方法例

方法	概要
トロイダル磁場コイル数の増加	コイル間の距離を短くすることでリップルを低減させる。
磁性材の挿入	コイル直下の真空容器近傍などに磁性材を設置し、コイルにて作られる磁場にて磁化させ、磁力線を操作し、総じてリップルを低減させる（ITERでは遮蔽体の一部をフェライト系ステンレス鋼にし、リップルを低減）。

もなる。このため、コイル数を増加する代わりにコイル直下の真空容器近傍などに磁性体材料を設置し、コイルにて作られる磁場にて磁化させ、磁力線を操作し、総じてリップルを低減させる方法がある。磁性材としては、炭素鋼、フェライト系鋼材、などが考えられる。磁性材のトカマク装置への適用については、JT-60Uなどにて実験的に研究が進められている[5]。また、ITERではフェライト系ステンレス鋼を遮蔽体として適用し、遮蔽性能を確保するとともに、リップルを低減させている[6]。

1.3 構造規格

1.3.1 構造規格とは

国内の原子炉は、電気事業法、原子炉等規制法、放射線障害防止法などの法律により規制されている。特に、発電用原子力プラントは、電気事業法による技術基準に適合することが義務付けられており、構造に関する詳細な規定として日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（過去には通商産業省「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通商産業省告示501号）」）として定められている。

この規格は、米国機械学会（ASME）の規格 Boiler and Pressure Vessel Code Section III の考え方が取り入れられており、各機器を安全上の重要度に応じて分類し、また運転状態を通常運転から単一故障、異常状態などに分類し、構造評価に当たっては破損モードを考慮に入れ応力を分類するとともに、それぞれの応力への制限を考慮し、原子力発電機器への構造健全性確保の規定を明確にしている。

核融合装置においても、ITERの誘致準備として「ITERの安全確保について」が文部科学省 ITER 安全規制検討会よりまとめられ[7]、これを受ける形でITERをひな型としたトカマク型核融合装置の構造規格の策定作業が日本機械学会において進められている。

核融合反応は、放射線安全上の特徴が核分裂反応と大きく異なり、また核融合施設には火力発電施設や既存の原子力発電施設の設備や機器と構造上本質的に異なる機器が存在する。このため、核融合施設の設備および機器の機械構造のためには新たな規格を作成する必要がある。

この核融合装置規格の開発の考え方は、文献[8]にまとめられており、ここではその概要を紹介するに留める。

1.3.2 核融合装置の安全上の特徴

ITERはトリチウム等の放射性物質を取り扱うが、現行の法律で規制される核燃料・核原料物質は取り扱わない。

さらに物理的にプラズマ生成上の制限があること等から、安全設計に当たり考慮すべき特徴は原子炉とは大きく異なる。

ITER に固有な安全上の特徴を以下に示す。

- (1)核融合反応で発生する中性子 (14 MeV) は他の核融合反応に寄与しない。したがって、連鎖反応を生じないため、核的暴走はあり得ない。
- (2)プラズマは安定に維持できる条件が限られ、かつ微少な不純物混入 (例えば、冷却水 0.1 g/s) で消滅する (プラズマの反応停止に関する固有の安全性)。
- (3)残留熱は放射化に起因するもののみである。この結果、発熱密度が低く、ITER では残留熱除去は自然放冷で十分であり、特段の設備を必要としない。
- (4)燃焼プラズマの実験を行う装置である ITER では、プラズマ電流消滅に起因する大きな電磁力は、通常状態における荷重として扱われ、また、プラズマ消滅後には作用しない。

これらの特徴から、通常の運転範囲の条件から逸脱しても、プラズマの熱エネルギーや磁気エネルギー等に起因する閉じ込め障壁の健全性に影響を与える因子が顕在化することはない。したがって、適切な耐荷重性と耐震性が確保されていれば、放射性物質の閉じ込め障壁を壊すことなく放射性物質が閉じ込め障壁から異常に放出される事態 (管理目標値を上回るような放射性物質の異常な放出) には至らない。すなわち、事故に拡大することはない。また、事故を仮定してもそれが拡大することはない。

以上のことから、ITER の放射線安全確保の施策、安全設計として、基本的にはトリチウム等の可動性放射性物質を閉じ込めることが重要であるが、何らかのトラブルや事故時には ITER は自然に「止まる」、「冷える」ことから、閉じ込め障壁を護るためのその他の設備は不要である。

核融合装置規格の策定においては、安全上の特徴の特有さ、さらにこれらを考慮した安全設計の特有さを核融合装置規格に適切に反映することが重要である。このため、機械学会の核融合装置規格 (仮称) では、ITER の安全機能を有する機器に要求される品質水準は、告示501号における第4種機器相当とするのが妥当であると考え、策定作業を実施している。

1.3.3 核融合真空容器の構造規格上の課題

真空容器は、構造の複雑さおよび電磁的荷重の特有さのために以下を考慮する必要がある。

- (1)「公式による設計」が適用できず、「解析による設計」とする場合でも3次元有限要素法解析を必要とする。
- (2)1次応力の評価において従来規格では評価断面において1次応力を膜応力、曲げ応力、局部膜応力に分類し、それぞれについて許容値と比較するという応力基準を採用しているが、この評価断面の特定は容易ではない。
- (3)製作上および組立上の制約から外壁側に対し特殊なT継手を採用している。(二重壁容器の場合、1.4.5章参照。)
- (4)この特殊な溶接継手に対する非破壊検査の方法が確立されていない。

- (5)現地溶接部について、非破壊検査上の空間的制約があるため、溶接技術として検査不要を保証できる実質的に欠陥フリーの溶接方法を導入する必要がある。

これらの課題とともに、ITER が国際プロジェクトであることも考慮し、国際性を損なわないよう努力するとともに、原子力分野で培われた最新の技術的知見を取り入れ、規格策定作業が進められている。

1.4 真空容器設計の進め方と基本構造例

1.4.1 真空容器設計フロー

上述した要求条件を考慮し、真空容器の概念を決め、構造設計へ展開するための設計フローを Fig.1 に例示する。以下にそれぞれの設計に際し留意すべき事項を纏めるとともに、個別の基本構造について例示する。

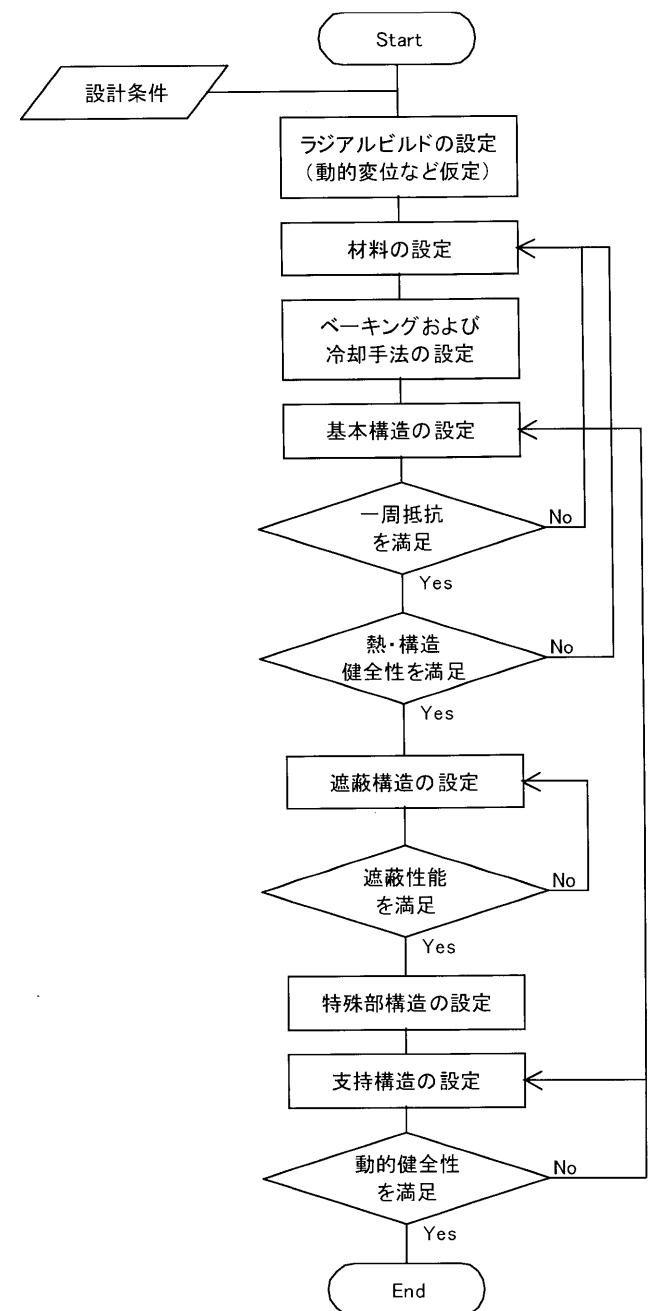


Fig. 1 真空容器の構造設計フロー例

1.4.2 ラジアルビルドの設定

真空容器は、プラズマとプラズマ閉じ込めに要する磁場生成コイル群の中間に位置する。特に、プラズマにコイル群を近づけ、コイル構造を極小化（特に超伝導コイルについて）し、製作コストを削減するとともに、コイルへの必要通電電流を減らす必要がある。このため、真空容器には厳しい空間取り合いが要求される。空間取り合いを検討するにあたり、考慮すべき要因を Fig.2 に纏める。必要な空間として、構造物の温度条件に起因する熱膨張変位（静的変位）、ディスラプションや地震時における構造物間の動的変位、さらに個々の構造物の製作、組立および設置に要する精度などを考慮する必要がある。特に、厳しい空間制約の中で許容される製作に関する精度への要求は厳しくなりがちである。真空容器は通常、溶接構造物となるため、必要となる高い精度を確保する製造技術にはきわめて高度なものが要求される。

1.4.3 材料の選定

真空容器構造材料の選定は、構造強度だけでなく、熱伝導、遮蔽、一周電気抵抗などを考慮して選定する必要がある。また、特に大型構造物となる場合、材料の入手性、材料を成形加工、溶接する製作費用および製作工程の諸条件を考える必要がある。一般的に、オーステナイト系ステンレス鋼は、汎用材であり、特にSUS316系は加工による磁化もなく、核融合環境には適する。また高ニッケル材であるインコネルも広く使われている。しかし、例えば、JT-60Uの真空容器に採用されたインコネル625は素材強度と電気固有抵抗値も高い利点を有するが、成形加工および切削加工のきわめて難しい材料であり、かつ入手性も容易ではなく、製造者泣かせの材料である[2]。

これらの従来材に加え、将来の核融合原型装置向け構造材には、耐中性子照射損傷、耐放射毒性、必要強度などを考えたフェライト鋼などの材料開発などが進められており、今後の成果が期待される。

真空容器には、構造材以外に遮蔽体およびリップ低減の磁性材などが適宜使われる。

1.4.4 ベーキングおよび冷却手法の選定

ベーキングおよび冷却手法の選定は、ラジアルビルドの制約と対照して行う必要がある。ベーキングは、電気ヒータおよび加熱媒体を使う。加熱媒体で行う場合には媒体の流路を設ける必要がある。また、冷却にはガスおよび水を媒体として採用する。現有のJT-60UおよびJETではそれぞれ300℃および500℃のベーキングを実施しており、またITERでは200℃のベーキングを計画している[2, 3, 9]。加熱媒体としては、JT-60UおよびJETでは窒素ガスが、またITERでは水をそれぞれ採用としている。ITERの場合、通常運転時に要する冷却にも水を冷媒として使う予定である。

加熱および冷却に際し、部材に生じる温度分布により熱応力が負荷されるので注意を要する。特に厚板構造においては、板厚方向の温度勾配に起因し、高い熱応力が負荷されることがある。

1.4.5 基本構造の選定

真空容器は自重、電磁力、容器内機器からの荷重支持な

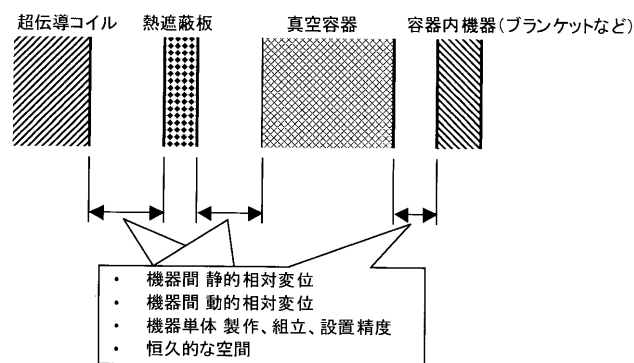


Fig. 2 真空容器廻りのラジアルビルド例

どに対応する構造強度を有する必要がある。また、中性子遮蔽などの特性を必要とするため、容器の板厚を増やし頑丈な構造とすべきであるが、一周電気抵抗値を確保するためには薄板を適用させる必要がある。これら相反する要求を同時に満足させる必要がある。

真空容器の典型的な基本構造例を Fig.3 に示す。基本構造には厚肉型と薄肉型に大別される。Table 6 に両者の比較を示す。厚肉型は、構造強度および遮蔽性能を板厚で確保するものの、一周抵抗の確保のため、前述した集中抵抗体を配置する必要がある。ただし、部分的に抵抗を確保させる場合、前述したプラズマディスラプション時に誘起される渦電流などにより抵抗体部分でジュール発熱する。また渦電流が抵抗体部分を迂回し、抵抗体両側にて電流の向きが反対となるため、ここにせん断力が作用するなどへの対応が必要となる。さらに、加熱・冷却に要する機構を別途設置する必要がある。Fig.3には集中抵抗体としてペローズ型と絶縁体挿入型を示す。

薄肉型は、一般的に二重壁構造であり、航空機の翼に採

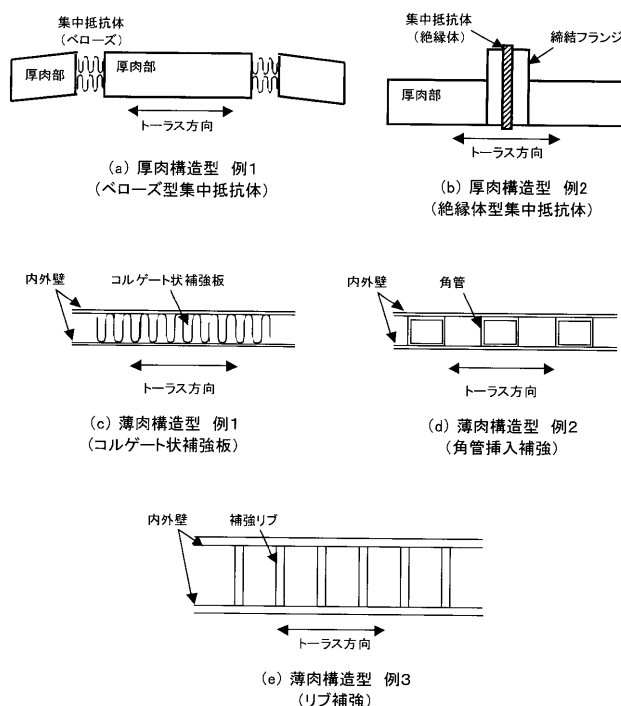


Fig. 3 真空容器一般部の基本構造例

Table 6 基本構造の比較（厚肉型と薄肉型の比較）

	厚肉構造型	薄肉構造型
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・高い機械強度 ・大きな一周電気抵抗（集中抵抗部適用の場合） ・高い遮蔽性能 	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が均一，かつコンパクト ・軽量 ・高い機械強度の確保
短所 (技術的課題)	<ul style="list-style-type: none"> ・重量物構造となるため，自重大 ・集中抵抗部にて構造が不連続となり複雑 ・集中抵抗部での発熱および熱応力対策要 ・一般部と集中抵抗部に異なる冷却構造が必要 ・集中抵抗部近傍での渦電流におけるせん断電磁力への対策要 	<ul style="list-style-type: none"> ・一周電気抵抗が低くなりがち ・二重壁容器の場合，内外壁間接続部材の強度確保 ・溶接による二重壁容器構築には種々の溶接継手を要し，製作精度確保が難しい

用される構造に類する。内外壁間を補強リブや矩形配管などにて固定し，全体を薄肉で構成することにより一周抵抗を確保し，また内外壁間距離を確保することにて剛性を保つ。遮蔽性能を得るために，二重壁内側，または外部に別途遮蔽体を設置する。さらに，加熱・冷却を二重壁間の空間に媒体を流して達成することも可能であり，前述したように広く採用されている。図には，二重壁間に挿入する補強材として，コルゲート状板，角管，およびリブを適用した例を示す。

1.4.6 特殊部構造の選定

真空容器はトロイダル磁場コイルの内側に設置されるため，コイル設置のためには，トラスを分割し，コイル設置後に分割部を接続させる必要がある。一例を Fig. 4 に示す。本例では，真空容器は間挿部となるセグメントを除き予め完成させ，トロイダル磁場コイル群を間挿部の設置空間を使って真空容器に挿入する。コイル挿入後，間挿部を真空容器一般部に接続する。この場合，間挿部はポロイダル断面にて分割構造となり，コイル挿入後の空間にて接続できる構造とする必要がある。この他に，真空容器をトラス方向に多数分割し，コイルと組合せながら真空容器を接続して組上げる方法がある。この手法は ITER にて採用されている [1]。

1.4.7 遮蔽構造の選定

ガンマ線の遮蔽に金属材を用いる場合，真空容器の内外壁に設置する方法と二重壁構造の容器の場合には，二重壁間に挿入させる方法が考えられる。後者の例を Fig. 5 に示す。遮蔽体として板材，また金属球を挿入する方法などが挙げられる。ただし，前述するように一周電気抵抗などの確保との整合が必要である。特に金属球の場合，表面に絶縁処理などを施す必要がある。

1.4.8 支持構造の選定

真空容器は，建設時の常温時，運転時，ベーキング加熱時などにて異なる温度環境にさらされる。このため，真空容器の支持構造は，内部機器を含む自重，電磁力だけでなく，異なる温度における熱膨張に対しても健全に支持する必要がある。自重および熱膨張は静的な荷重であるが，ディスラプションおよび地震時などの動的荷重に対しても，決められた空間（ラジアルビルドの範囲）にて変位を吸収させることが必要である。相対変位を吸収するための支持構造案を Fig. 6 に例示する。スライド式支持は，摩擦などにて動的に変位を吸収する構造であり，JT-60U などにて採用されている。重量物の摩擦すべりに注意を要す

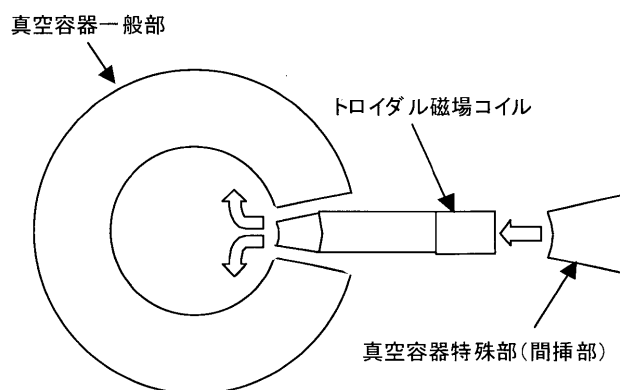


Fig. 4 トロイダル磁場コイル据付例および真空容器特殊部(間挿部)の概念

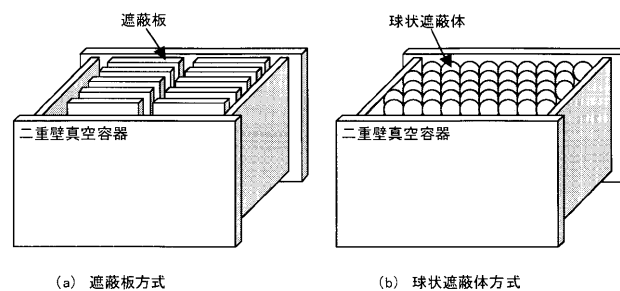


Fig. 5 ガンマ線遮蔽体の構造例(二重壁真空容器に設置の場合)

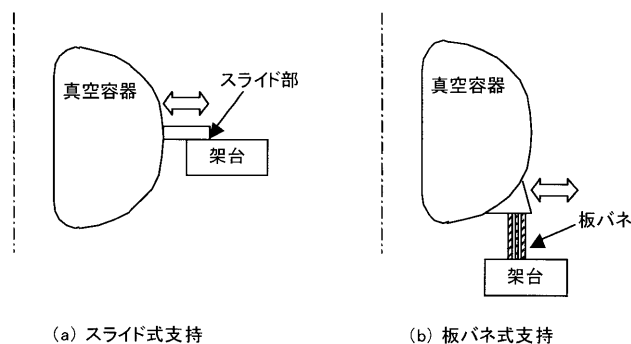


Fig. 6 真空容器支持構造例

る。また板バネ式支持は変位を板の弾性にて吸収する構造であり，ITER のコイル支持に採用されている。この場合，板の座屈に注意が必要である [1]。

1.5 構造設計例 -ITER-

ここでは、現在国際共同プロジェクトとして推進されている ITER の真空容器を例に、その構造設計について解説する。詳細は、文献[1]にまとめられているので参照されたい。

ITER では、重水素と三重水素を燃料とした核融合反応実験をめざすため、その真空容器には放射線遮蔽や核発熱除去を含め1.1節に挙げた機能すべてを満足させる必要がある。ITER 真空容器の構造およびポロイダル断面を Fig.7

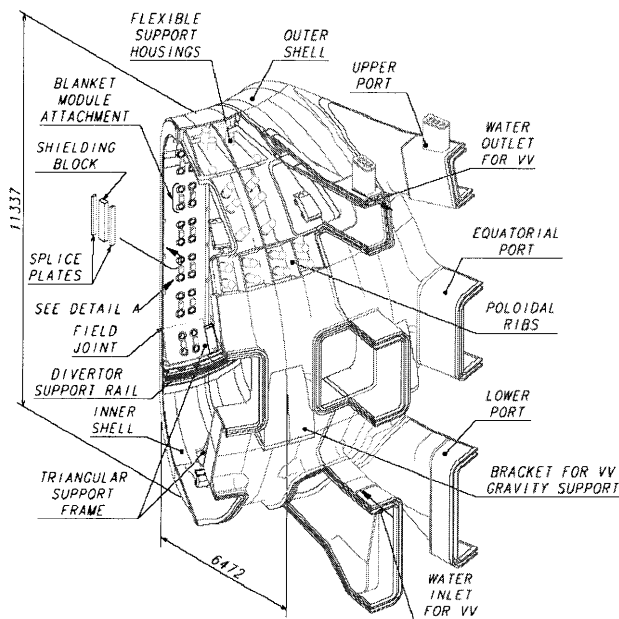


Fig. 7 ITER 真空容器

Table 7 ITER 真空容器の基本諸元

基本構造	二重壁 D 型断面真空容器
寸法	
全高	11.3 m
内周側最小半径	3.2 m
外周側最大半径	9.7 m
内外壁板厚	60 mm
内表面積	940 m ²
プラズマ領域内容積	1,600 m ³
材料	
構造材	SUS316L(N)-IG
遮蔽材	SUS304B7, SUS304B4
リップル低減用インサート材	SUS430
制御温度	
運転時	100℃
ベーキング時	200℃
循環水条件	
運転時	100℃ 1.1 MPa
ベーキング時	200℃ 2.4 MPa
電気抵抗	
トロイダル方向	7.9 μΩ
ポロイダル方向	4.1 μΩ
概略重量	
真空容器本体	2,540 トン
遮蔽体 (リップル低減用インサート材含む)	2,890 トン
ポート構造体	1,970 トン

および Fig.8 に、その基本諸元を Table 7 に示す。ITER 真空容器は、プラズマ断面形状に合わせ D 型断面を有した容器本体とポート構造体からなる。容器本体の大きさは、高さ 11.3 m、トーラスの外周半径が 9.7 m、内半径が 3.2 m であり、遮蔽体を含む概略重量は約 5,400 トンである。

容器本体は、二重壁構造を採用しており、内外壁は主に補強リブにて連結される全溶接構造である。内外壁はともに 60 mm の板材であり、補強リブは主に 40 mm の板材を用いる。容器の厚さは容器内周側で 337 mm、外周側で 750 mm である。材料はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 316L がベースの SUS316L (N) - IG (ITER Grade) であり、電子ビーム溶接性の向上を図るために窒素成分を調整し、またコバルト、ニオブ、タンタルなどの長半減期元素を極力除去した材料である。

二重壁間には遮蔽体を設置し、放射線遮蔽を行うとともに、核発熱除去の冷却水およびベーキングのための高温水の循環を可能としている。運転温度は 100℃、ベーキング温度は 200℃ に設定している。通常運転時に発生する最大熱負荷は約 10 MW である。水の循環は、基本的に容器下部より供給され、容器内周側と外周側に分かれて上方へ流す。水は非沸騰領域にて用いるため、特にベーキング時には約 2.4 MPa の高圧力が二重壁に負荷される。

遮蔽体は積層板材を用い、熱中性子吸収性を上げるため約 0.2% のボロン入りステンレス鋼 (SUS304B7, SUS304B4) を採用している。遮蔽体の二重壁間の空間占有率は約 60% で、残りは純水である。なお、遮蔽とトロイダル磁場のリップル減少を兼ねて、遮蔽体の一部を磁性材 (SUS 430) としている。飽和磁束密度は約 1.7 T に達する。

容器内には約 400 個の遮蔽ブランケットと 54 式のカセット状のダイバータが敷設される。個々のブランケットの支

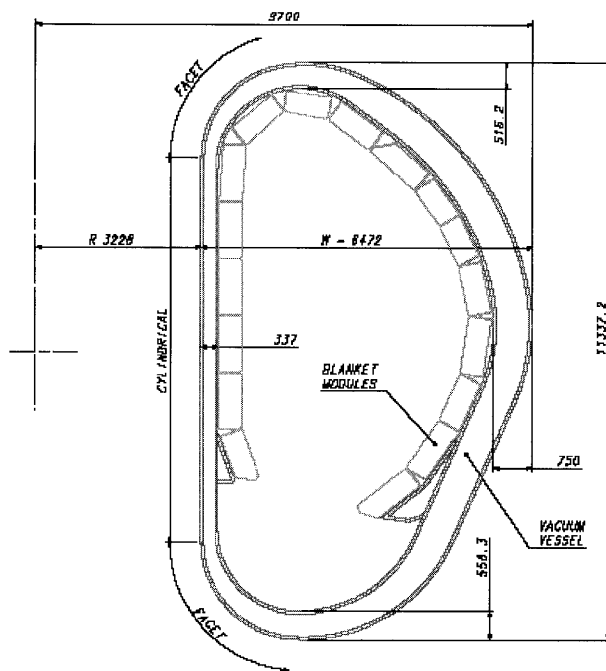


Fig. 8 真空容器断面

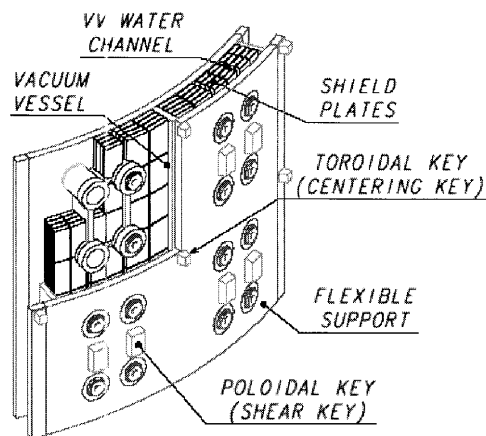


Fig. 9 真空容器内表面配置 (容器内遮蔽体配置含む)

持は4ヶ所のフレキシブルサポートと呼ばれる円筒支持構造体を介して、真空容器に直接取り付けられ、また電磁力荷重の一部はキーにより支持される。Fig. 9に容器内面状態を示す。フレキシブルサポート固定の円筒支持構造体は補強リブ同様に内外壁に固定される。

容器断面はプラズマ形状に合わせているものの、外周側下部のブランケット下の真空容器表面には電気伝導体である銅板を貼り、プラズマ垂直安定性を確保する。また、真空容器のトロイダル方向の一周抵抗はプラズマの制御性を考慮して約 $8\mu\Omega$ としている。

真空容器は、トロイダル磁場コイルとの組合せのためにトラス状に9分割され、 40° のセクターとして工場製作される。セクター間の接続は現地工事にて溶接接続されるが、アクセスが制限され、片側からのみの溶接となる他、リブ等の制約も加わり溶接部の非破壊試験も制限が厳しい特殊部となる。

真空容器の重力支持は、下部ポートに設置された台座より機械的リンク機構を介し、荷重・変位吸収ダンパー（空圧シリンダなど）にてクライオスタット上に支持される[10]。

ITER 真空容器の構造設計にて基本諸元を決めるに当たり、ポイントとなった点を以下に纏める。

- (1)内外壁の厚みとリブ配列：これらの仕様は主にベーキング時の高温水圧力にて決定。
- (2)二重壁容器の剛性：基本的に真空容器に使える空間を最大限使い、二重壁高さなどを選定。特に設計に影響を及ぼす荷重は、プラズマディスラプションでの垂直移動事象 (VDE) およびトロイダル磁場コイルの高速電流消滅 (クエンチ) における電磁力である。
- (3)内周側の二重壁容器剛性：上記に加え、特に内周側では、トロイダル磁場コイル電流の高速消滅時に起因する電磁力が厳しく、座屈なども考慮した構造 (主に補強リブなど) を決定。

1.6 まとめ

核融合装置にてプラズマの閉じ込めに要する真空を維持するため要する真空容器について、必要となる機能、その機能を満たすために要求される条件、構造上の概念などを例示し、解説した。また、真空容器に関する一般的な設計の進め方を例示するとともに、現在建設が推進されているITERの真空容器の構造設計例を紹介した。ITERも含め核融合装置において、真空容器は、放射性物質である三重水素を閉じ込めるための安全障壁となり、原子力発電プラントにおける原子炉容器に相当する高い信頼性が要求される。したがって、ITER以降に計画される核融合原型装置などに向けては、装置構造設計、材料開発だけでなく、核融合装置での特徴ある負荷荷重なども考慮した構造規格の整備なども必要である。

参考文献

- [1] ITER Technical Basis, ITER EDA Documentation Series No. 24, IAEA, Vienna, 2002.
- [2] 内川高志他：日本原子力学会誌 36, 532 (1994).
- [3] John Wesson, The Science of JET - The achievements of the scientists and engineers who worked on the Joint European Torus 1973-1999, JET Joint Undertaking, Abingdon, Oxon, OX14 3EA, UK (2000).
- [4] T. Uchikawa, S. Kuri, S. Kuribayashi, M. Yamada and K. Ioki, *Proc. 10th Symp. Fusion Engineering* (1983).
- [5] K. Shinohara, Y. Suzuki, S. Sakurai, K. Masaki, T. Fujita and Y. Miura, *Plasma and Fusion Research* 1, 007 (2006).
- [6] M. Onozuka, G. Johnson, K. Ioki, G. Sannazzaro, Y. Utin, K. Takahashi, T. Iizuka, R. Parker, K. Koizumi, E. Kuzmin, H. Neilson, B. Nelson, and C. Vallone, *Proc. 17th Symp. Fusion Engineering* 1013 (1997).
- [7] 文部科学省 ITER 安全規制検討会：“ITERの安全確保について”，(2003).
- [8] 中平昌隆他：保全学 4, 47 (2006).
- [9] M. Onozuka, K. Ioki, G. Sannazzaro, Y. Utin, and H. Yoshimura, *Fusion Engin. Des.* 58-59, 857 (2001).
- [10] K. Ioki, P. Barabaschi, V. Barabash, S. Chiochio, W. Daenner, F. Elio, M. Enoeda, A. Gervash, C. Ibbott, L. Jones, V. Krylov, T. Kuroda, P. Lorenzetto, E. Martin, I. Mazul, M. Merola, M. Nakahira, V. Rozov, Yu. Strebkov, S. Suzuki, V. Tanchuk, R. Tivey, Yu. Utin and M. Yamada, *Nucl. Fusion* 43, 268 (2003).



なかひらまさたか
中平昌隆

1992年早稲田大学機械工学修士課程修了、日本原子力研究所でITERの構造的な設計、製作に関する研究開発に携わる。2004年筑波大学にて博士(工学)取得。主に真空容器の国内開発を担当。最近核融合構造規格開発を進めており、JSMEやASMEの規格委員会に参加中。幼稚園生2児の父であり、仕事も育児も楽しんでいる方だが、趣味のカメラやキャンプ、バイクの時間はなくなった。

用語解説

ラジアルビルド

装置の概略形状、寸法取り合いの設定にて、装置中心より半径方向（ラジアル方向）に必要な機器の空間、機器間の間隙などを設定する。考慮すべき要因例を本文 Fig. 2 に示す。

公式による設計 (Design by Formula)

構造物の必要最小板厚や、限界圧力等を予め精査され、規格委員会等で承認された理論または実験的な数式を用いて求め、設計する方法。圧力容器規格等により、円筒や球など、比較的単純形状に対して、圧力に対する評価式が多く整備されている。ASME B&PV Code Sec. I, Sec. VIII Division 1 の設計規程等がこれに該当する。

解析による設計 (Design by Analysis)

起こりうる破壊様式を想定し、各破壊様式に対応する設計基準を用意し、解析により構造物の健全性を詳細に評価し、設計する方法。解析は有限要素法等の計算コードによることが近年多いが、手計算で応力評価をすることも解析に当たる。ASME B&PV Code Sec. III NB, Sec. VIII Division 2 の設計規程等がこれに該当する。

1 次応力 (Primary Stress)

一次応力は、外荷重により発生する応力で、材料の厚み全体にわたって降伏点を超えて増加すると、破断に至るものであり、荷重制御型の応力である。これに対して、熱膨張に対する拘束に起因して生じるような、変位制御型の応力等、材料が変形することにより応力が減少するなどして、破断に至ることは考えられない応力を二次応力という。

告示501号第1章第2条および日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME SNC1-2005, GNR-2130 に詳述されているので、正確にはそちらを参照されたい。

膜応力 (Membrane Stress)

応力を仮想面に垂直な方向（垂直応力）と、平行な方向（せん断応力）に分解し、評価対象とする断面内で、垂直応力の平均値をその断面の膜応力という。

告示501号第1章第2条および日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME SNC1-2005, GNR-2130 に詳述されているので、正確にはそちらを参照されたい。

曲げ応力 (Bending Stress)

評価対象とする断面内の応力分布を線形近似した際の、膜応力からの変化分を曲げ応力という。

告示501号第1章第2条および日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME SNC1-2005, GNR-2130 に詳述されているので、正確にはそちらを参照されたい。

局部膜応力 (Local Membrane Stress)

膜応力のうち、発生範囲が局部的なものをいう。ここで、「局部」とは、この応力が一次一般膜応力に対する許容応力値の 1.1 倍以上である範囲が $\sqrt{(R \cdot t)}$ (ここで R : 当該箇所 の板厚中心における最小半径, t : 当該箇所 の最小板厚) 以内であり、かつ、この応力が一般膜応力に対する許容応力値の 1.1 倍を超える他の範囲と $2.5\sqrt{(R \cdot t)}$ (ここで $R = (R1 + R2)/2$, $t = (t1 + t2)/2$, $R1, R2$: 当該箇所それぞれの板厚中心における最小半径, $t1, t2$: 当該箇所それぞれの最小板厚) 以上近接していない範囲をいう。(参照: ASME 2004年版 Sec. III NB-3213.10)