



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	核融合炉・真空容器内外の冷却材喪失事故（LOCA）の制御：真空容器内のLOCAによる圧力上昇の数値計算
Author(s)	広畑, 優子; Hirohata, Yuko; 日野, 友明 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 176, 7-16
Issue Date	1996-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42466
Type	departmental bulletin paper
File Information	176_7-16.pdf



核融合炉・真空容器内外の冷却材喪失事故(LOCA)の制御 —真空容器内のLOCAによる圧力上昇の数値計算—

広畑 優子¹⁾ 日野 友明^{1,2)} 山科 俊郎¹⁾
(平成7年7月14日受理)

Containment of loss of coolant accident (LOCA) in fusion reactor — Numerical calculation of the pressure rise due to in-vessel LOCA —

Yuko HIROHATA, Tomoaki HINO, Toshiro YAMASHINA
(Received July 14, 1995)

Abstract

Active cooling components have to be employed in the divertor of a fusion reactor to handle the large power flow from the core plasma. The extremely large thermal stress and electromagnetic forces acting on these components may cause cracking of cooling pipe. Since the inner wall and the vacuum vessel are significantly damaged by this loss of coolant accident, LOCA, the control scheme have to be considered. The process of in-vessel LOCA was investigated, and then several control schemes such as the use of expansion volume, the use of shielding shutter and the use of heat sink were suggested. In addition, the pressure rise of the vacuum chamber due to water leak was calculated for the scheme to uses of the expansion volume and roughing pump systems by using the parameters of ITER/CDA. The pressure rise in the vacuum chamber can be controlled within designed pressure of chamber, e.g., 2 atm, when the pinhole diameter is less than 1 mm. When the expansion volume is assumed to be the same size as the chamber, the time period until the pressure increases up to 2 atm becomes 3 hr when the pinhole diameter is 10 mm. The pressure can be decreased to 0.2 atm by using a roughing pump system.

1. はじめに

核融合炉ではダイバータ部に強制冷却付き接合材からなる高熱流束機器を設置し、数10MW/m²の熱流束を除去しながら熱および粒子制御を行う¹⁾。高熱流束機器は正常運転時では、その寿命レベルまでは破損しないとみなせるが、ディスラプション時のように過酷な熱負荷や電磁力がかかった場合には冷却用パイプが破断し、冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)が発生することが予測される。LOCAには真空容器内(In-vessel LOCA)と真空容器外(Ex-vessel LOCA)で発生するものに大別できる。LOCAが発生すると冷却材の水が容器内に放出され、高温

¹⁾原子工学科高真空工学講座

²⁾文部省核融合科学研究所

の壁に触れて水蒸気となり容器内の圧力が上昇し、ついには真空容器が壊れてトリチウムや放射化されたダストが容器外にもれることが考えられる。このような重大事故に至らないまでも、水蒸気の放出によりプラズマ対向材料が著しく損耗したり容器内壁の汚染をもたらす。従って、LOCAは核融合炉の安全性、保守・修理、プラズマ放電シナリオの評価において極めて重要である。ITER（国際熱核融合炉）の概念設計(EDA)ではLOCAの評価が始まってきているが²⁻⁵⁾、LOCAのシナリオの系統的な評価やLOCAへの対策は未だ十分検討されていない。真空容器をはじめ炉のコンポーネントの設計を行うためにもLOCAへの対応策を早急に考える必要がある。

本研究では、In-vessel LOCA および Ex-vessel LOCA のプロセスを考えると共に、In-vessel LOCA による真空容器内の圧力上昇を数値解析し、LOCA への対応法についても検討した。

2. LOCA の原因とその制御

ITER/CDA では核融合炉の事故の頻度を検討している¹⁾。この中で最も頻度の高い事故は炉の運転中におけるダイバータ部の In-vessel LOCA で、年間 1 回から 0.1 回発生すると報告している。Fig.1には In-vessel LOCA のプロセスを示している。In-vessel LOCA の直接的な原因は、ダイバータ部への過剰な熱負荷および電流遮断時の強力な電磁力により、接合材のプラズマ対向

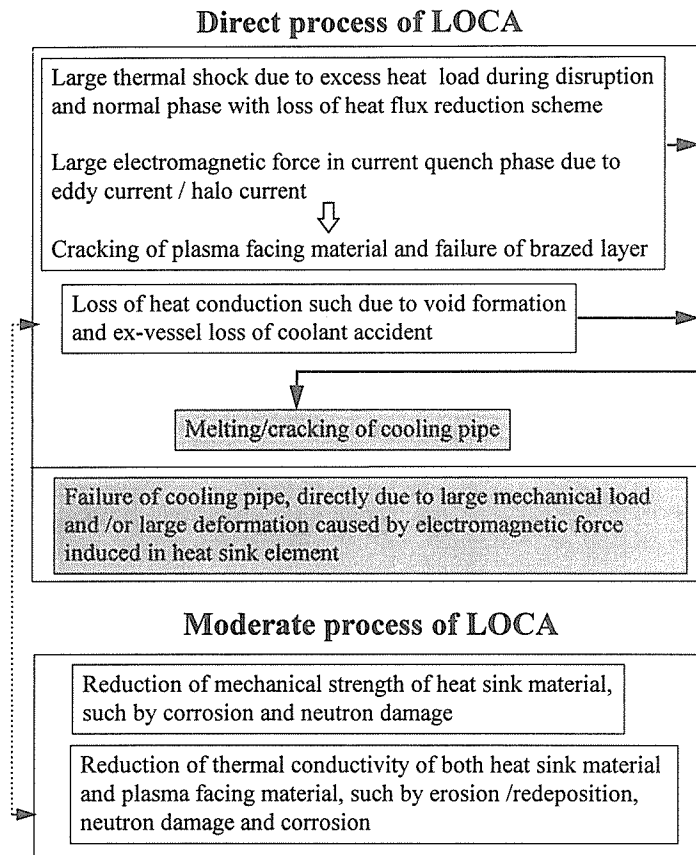


Fig. 1. Process of Loss of Coolant Accident (LOCA) in a nuclear fusion device.

材料にクラッキングが発生し、ヒートシンク材の溶融および冷却パイプの破断が起きることである。また、同じ現象は冷却系の内部で気泡が発生したり、Ex-vessel LOCA の発生により冷却材の流れが停止し、ダイバータ部の熱除去に失敗した場合にも起こる。In-vessel LOCA が起こると、プラズマ中の酸素不純物、軽水素密度が上昇し、ディスラプションが起きプラズマが壊れる。ディスラプションまでの時間を一点炉近似で見積ると、1mm φ の pinhole クラックからの水リークを仮定した場合、この時間は msec のオーダーとなり、短時間でディスラプションが発生する⁶⁾。このハードなディスラプションにより大きな熱負荷と電磁力がかかり炉壁が破損したり、あるいは損耗により寿命が縮まっていく。プラズマ対向材料や炉壁材(C, Be)の水蒸気による化学反応が発熱を伴うなら被害はより大きくなる。これらの結果、内壁が汚染されるとともに、修理も必要となることから炉の稼働効率が大きく低下することになる。

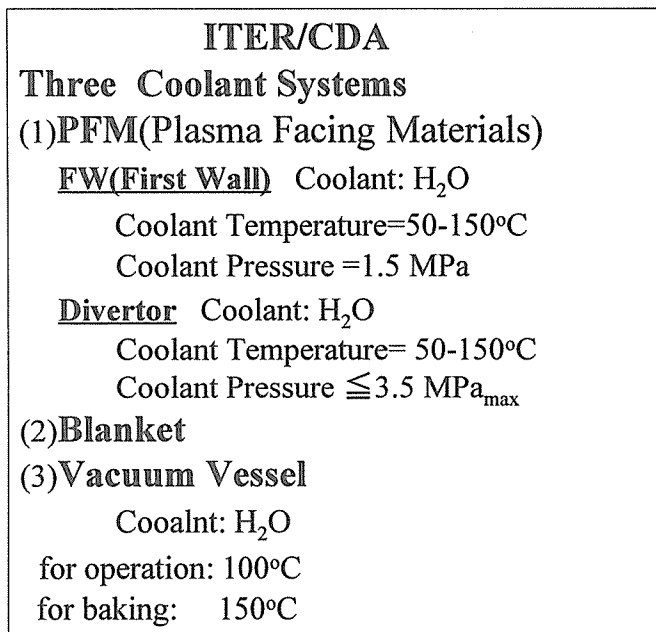


Fig. 2. Coolant systems of ITER/CDA.

ITER/CDA では3つの冷却系統を考えており、いずれの系統でも一次、二次およびヒートシンクに接続する3つのループの冷却系からなっている(Fig.2)。現段階では冷却材はすべて水であり、水温は50~150°C、水圧もダイバータでは最大3.5MPa(35気圧)と報告している。LOCAの結末は、LOCAの発生場所、規模および炉の運転状況によって大きく異なる。そのためこれらを想定したLOCAの制御を考える必要がある。Fig.3にLOCAの制御のシナリオを表した。まず、LOCAの発生を分光法、IRカメラ、ボロメーターなどによってすみやかに検出し、プラズマ、冷却系および真空容器の圧力上昇の観点から対策を講じる。プラズマの点からは、In-vessel LOCAでは先に述べたように短時間でプラズマは停止するが、Ex-vessel LOCAでは不純物を注入する能動的な放電停止法を考える必要がある。また、ダイバータ部の保護のためにシールドリングシャッターを挿入することも考えられる。冷却系では、破損した冷却系の水の供給の停止、真空容器内

の圧力上昇をさげるためには、膨張容器への水蒸気の逃がしや、ヒートシンクによる水の凝縮などが考えられる。

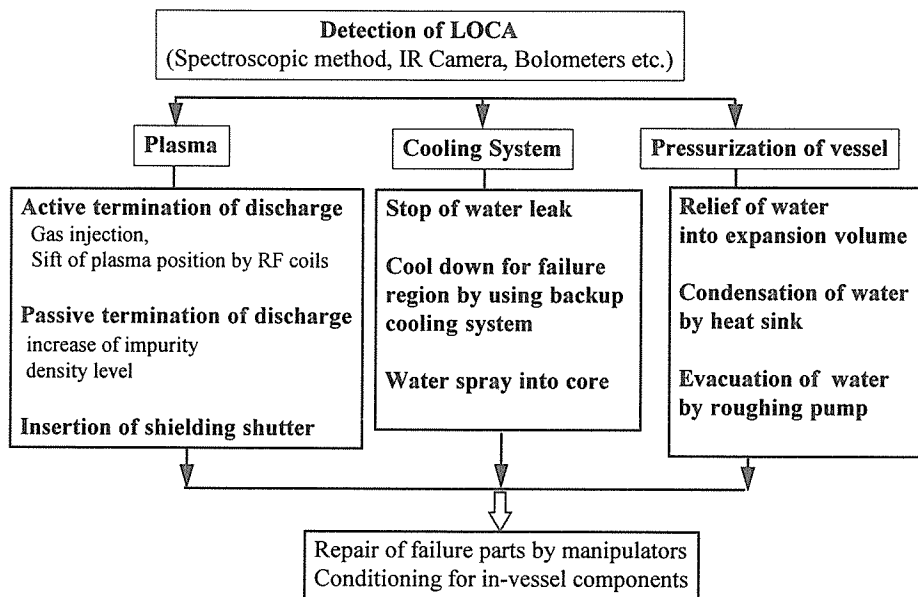


Fig. 3. Scenario of the containment for LOCA.

3. 水蒸気による真空容器内の圧力上昇の数値計算

本研究では水蒸気による真空容器内の圧力上昇の数値計算を試みた。容器内の圧力は、冷却材の条件や貯蔵量、容器の体積およびポンプシステムによって決まる³⁾。数値計算にあたり、次のような仮定を行った。まず、LOCA 発生条件としては、in-vessel の primary loop で生じた pin hole から、水が水蒸気として真空容器内にリークする。この時、炉は normal operation 中とする。

従って、プラズマは LOCA の発生と同時に停止する。ここで、プラズマ対向材料がカーボンであれば、材料の表面温度によっては水との化学反応が起こり、CO や H₂ が生成することが考えられる。ITER/CDA では Fig.2 に示すように第一壁 (FW) は最大温度 300°C、ダイバータでは磁力線の照射する面積から、全面積の約 1% が 1800°C、9% が 1500°C、その他は 1000°C 以下としている。LOCA が発生すると、最大で 300~500 秒間でダイバータの表面温度は 700~800°C に低下すると予測している²⁾。さらに ITER の工学設計 (EDA) ではダイバータへの熱・粒子負荷を低減し、この温度を下げる試みが検討されている。また、カーボンと水との化学反応率は 800°C では減少することから²⁾、ここでは、化学反応による CO および H₂ の発生はないものとした。

数値計算には ITER/CDA で報告されている値を用いた (Fig.4)。すなわち、LOCA の発生場所はダイバータ部で、冷却材の水圧は最大値である 3.5 MPa、水蒸気温度は 100°C とし、pinhole の直径を 1~100 mm と変化させた。従って、ここでは第一壁および真空容器の壁の温度は無視した。

真空容器はポンプまでのダクトの部分を含めるとほぼ 3000 m³、ポンプの設計実効排気速度 (S_{eff}) は 700 m³/s である。また、燃料の流速は、22~47 Pa/m³/s である。

CoolantCoolant : H₂O

Break coolant system : Divertor

Pressure of coolant :3.5 MPa

Temperature of coolant: 100 °C

Break diameter of pin hole:1, 10,100 mm

Reactor

Major radius :6 m

Minor radius :2.15 m

Vacuum vessel volume :1600 m³Free volume :1600 m³Total volume(contain ducts):3000 m³Conductance of pipe :1000-1500 m³/sEffective pumping speed: 700 m³/s

Pump system: Cryo pump (Operation)

TMP (Conditioning)

Fuel flow rate :22-47 Pa · m³/s

Condensation of stream and chemical reaction of graphite do not occur.

Fig. 4. Parameters for numerical calculation (Example: ITER/CDA).

3. 1 LOCA 発生後も真空ポンプの実効排気速度が持続している場合

まず、数値計算に当たり、LOCA 発生後も真空ポンプが operation 中と同じ実効排気速度を維持している場合の容器内の圧力の時間変化の数値計算を試みた。この場合の容器の圧力 P_v は、次式のように表される。

$$P_v(t) = \left(P_o - \frac{Q}{S_{eff}} \right) \exp \left(- \frac{S_{eff}}{V_v} t \right) + \frac{Q}{S_{eff}} \dots\dots\dots(1)$$

ここで Q はリークした水蒸気の流量 [kg/s] であり、pinhole の面積 A [m²] に水が音速 (= 最多確率速度) で入射すると考えて概算した。ここで γ は水の比熱比でほぼ 3 原子分子の比熱比 1.33 を用いた。また、温度 100°C の水の密度 (ρ) を 1×10^{-3} kg/cm³ とした。

$$Q = A \rho \sqrt{\gamma \frac{k_B T}{m}} = A \sqrt{\gamma \rho P} \text{ [kg/s]} \dots\dots\dots(2)$$

数値計算には Q 値を Pa · m³/s の単位になおし(1)式に代入した。pinhole の直径を 0.1~100mm と変

化させて数値解析を行った時の真空容器内の圧力の時間変化を Fig.5に示した。

まず、真空容器内の圧力は、燃料の導入によってほぼ $(5-6) \times 10^{-2}$ Pa程度で維持されている。 $t=0$ の時点でLOCAが発生すると、(1)式に従って圧力は上昇するが、いずれの直径の穴でもLOCA発生後20秒以内で一定の圧力となる。その圧力は穴の直径が大きいほど高くなる。いま、真空容器の設計耐圧が2気圧であるとする、ポンプの排気速度が変化しなければ100mmφの穴から水蒸気が放出されても十分容器は持ちこたえられることが分かる。しかしながら、実際に用いるポンプの排気速度は、圧力が10Pa以上の高圧になると急激に排気速度が下がり、100Paでターボ分子ポンプなどは停止してしまう。また、停止しないまでも多量の水蒸気負荷によって破損することが考えられる。従って、1mmφを越えると容器内の圧力が急激に上昇してしまうことが考えられる。穴の直径が小さくとも、容器の耐圧である2気圧近傍まで、短時間に上昇すること予想される。

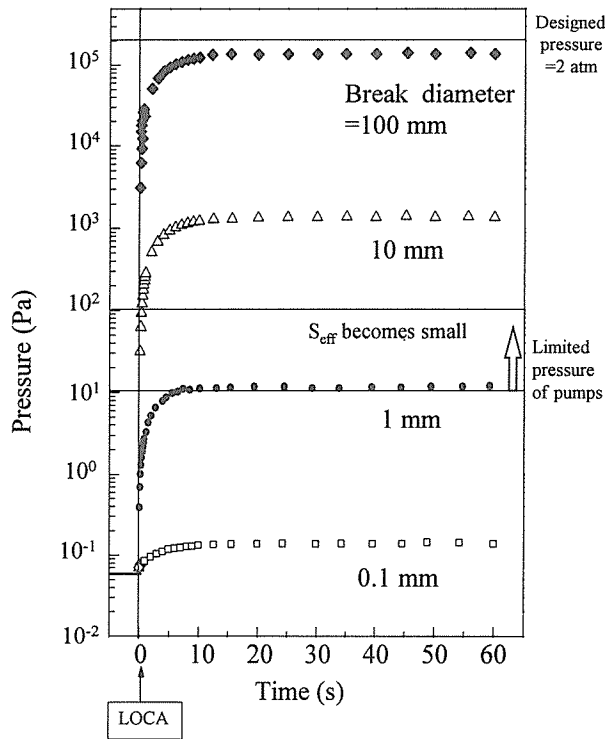


Fig. 5. Pressure rise when effective pumping speed is kept constant after the occurrence of LOCA.

3. 2 膨張容器へ水蒸気を逃がした場合

そこで、ポンプの限界圧(=10Pa)になると、ポンプ保護のためにバルブを閉じ排気を停止し、膨張容器に水蒸気を逃がすことが考えらる。膨張容器が真空容器と同じ体積(=3000m³)とした場合の容器内の圧力上昇の数値計算を試みた。膨張容器までのパイプのコンダクタンス C_p を1~1500 m³/s と変化させた。この場合の膨張容器へ流れ込む水蒸気の流量は、

$$Q_p = C_p(P_V - P_E) \dots\dots\dots(3)$$

となり、圧力差が小さくなると Q_p も小さくなる。この時の真空容器内の圧力の時間変化を微小時間内では Q_p は一定であり、その値は(3)式から求めるとして、(4)式から求めた。

$$P_{V(n)}(t) = \frac{Q}{V_V} t - \frac{\int_0^t Q_P(t) dt}{V_V} + P_{V(n-1)} \dots \dots \dots (4)$$

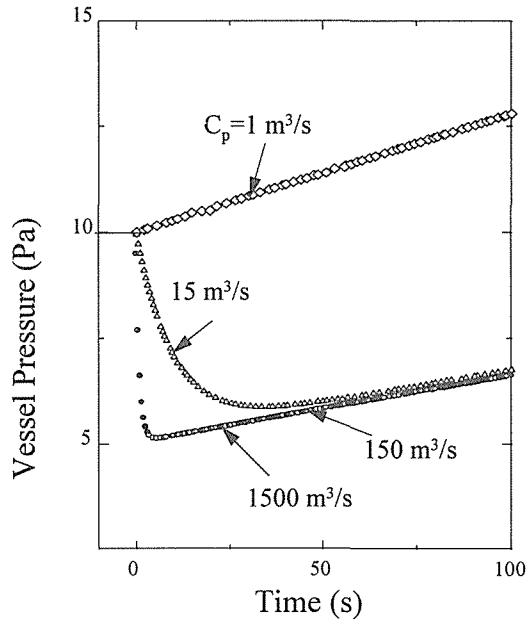


Fig. 6. Change of vessel pressure when expansion volume is opened. Break diameter of pinhole is 0.1 mm.

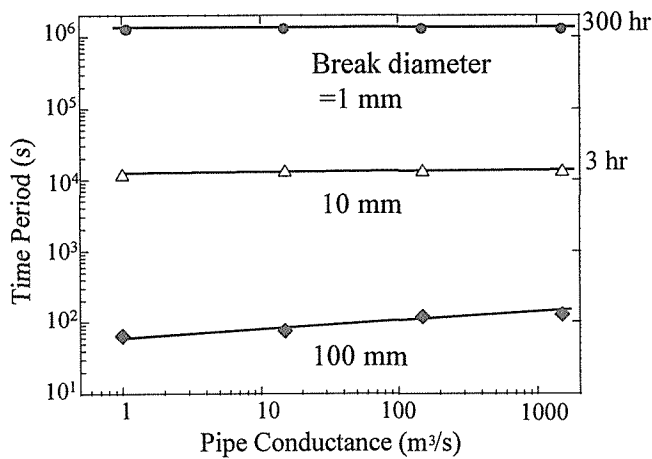


Fig. 7. Time period until vessel pressure increase up to designed pressure (=2 atm) of the vessel as a function of pipe conductance. In the case that water vapors flow to the expansion volume after the pumps were stopped.

Fig.6には直径0.1mmの pinhole の真空容器内の圧力変化を示したものである。パイプのコンダクタンスが大きいと一度圧力は減少するが、50秒ほどで圧力は時間と共に増加する。膨張容器へ水蒸気を逃しても、時間が経つと圧力上昇が起き、容器の耐圧まで上昇することが予想される。耐圧までの時間とパイプのコンダクタンスの関係を Fig.7に示す。コンダクタンスが小さいと若干この時間は短くなるが、ほぼ一定で、穴の直径が10mmでも3時間で2気圧を越えてしまうことが分かる。

3. 3 荒引きポンプによる水蒸気の排気

そこで、容器耐圧を越えた時点で、荒引きポンプで炉外に水蒸気を排気することを考える。荒引きポンプの排気速度と総合コンダクタンスを変化させて、真空容器の圧力の時間変化を数値計算を行った。この時、膨張容器も一つのパイプとして総合コンダクタンスの中に入れ考慮した。圧力は、容器出口における実効排気速度 S_v によって(1)式と同じように次式のように表わされる。

$$P_v(t) = \left(2 \times 10^5 - \frac{Q}{S_v}\right) \exp\left(-\frac{S_v}{V_v} t\right) + \frac{Q}{S_v} \dots \dots \dots (5)$$

Fig.8は、荒引きポンプの実効排気速度を50m³/sとしたときの圧力変化を示したものである。パイプのコンダクタンスによらずほぼ同じ傾向を示し、直径10mmの穴では、250秒で2気圧から0.2気圧まで降下させることができる。しかし、100mm φでは10気圧まで上昇してしまうことが分かる。実際には市販の荒引きポンプを用いて、2気圧の水蒸気の排気速度がこのような大きな値を持つことは期待できない。また、放射性物質の管理も考えなくてはならない。

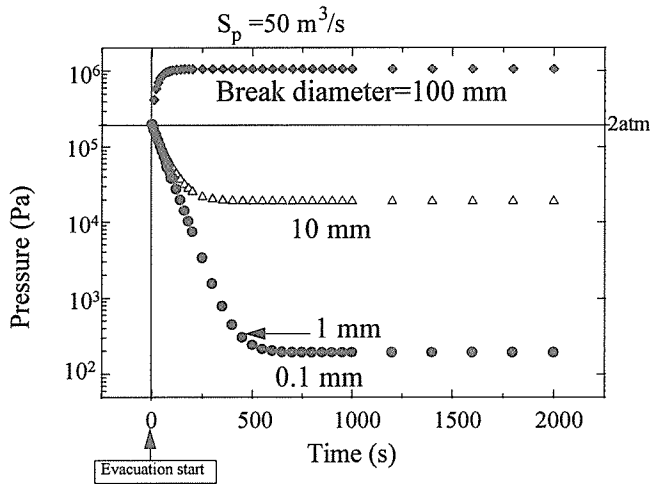


Fig. 8 Pressure rise when roughing pumps work after the pressure exceed designed pressure of chamber.

4. ま と め

核融合炉内で in-vessel LOCA が発生した場合の水蒸気による圧力上昇を数値計算した。その結果、(1)穴の直径が小さく圧力上昇がポンプの限界圧以下にとどまるような場合は、シーリングシャッターによる高熱流束機器の保護をしながら炉内で対向材料を冷却することが可能である。しかし、(2)穴の径が大きくなった場合は、ポンプを停止し水蒸気を膨張容器に逃がすことに

よって容器耐圧までの圧力上昇時間を極力長くする必要があるが、その方法は本研究の数値計算からその時間的猶予は10mm φ の穴でも3時間程度でしかないことが分かった。また、(3)荒引きポンプを用いての排気は現実的に不可能であることも分かった。

従って、LOCA が発生した場合はヒートシンクで冷却し、水として凝縮しなければ LOCA は制御できないものと考えられる。ITER/CDA ではプラズマ対向材料のカーボンの水性化反応が低下する約800°Cまで材料表面の温度を低下させるには、約200~300秒かかると報告している。したがって、この時間内での圧力が容器耐圧以下になるように制御する必要がある。その後は、水の形で凝縮するというシナリオが考えられる。また、飽和水蒸気圧力が2気圧になる温度は120°Cであることから、容器壁の温度が120°C以下であれば問題はないと考えられる。

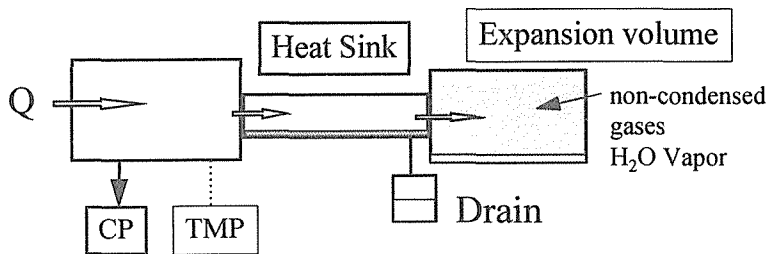


Fig. 9. Containment of LOCA by using heat sink and expansion volume.

本研究の数値計算から、Fig.9のようなシステムが考えられる。つまり、ヒートシンクまでのパイプのコンダクタンスを極力大きくするか、圧力差で破壊するようなディスク状の隔膜によってヒートシンクに水蒸気を流し、ここで水として凝縮する。ここで耐圧を越える圧力になったら、膨張容器かもしくは建屋の空間中に水蒸気を放出し、LOCA を制御する。

今後は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)のパラメーターを用い、LOCA 発生後の圧力上昇を数値計算すると共に、容器壁温度を考慮に入れた圧力上昇を解析する。

謝 辞

本研究は、文部省核融合科学研究所の共同研究として行われたものである。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) International Atomic Energy Agency, ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series, No. 18, IAEA Vienna (1991).
- 2) International Atomic Energy Agency, ITER Conceptual Design Report, ITER Documentation Series, No. 36, IAEA Vienna (1991).
- 3) R. Blomquist and K. Johansson: Fusion Technology 1992 (Elsevier Sci. Publ.), Vol. 2 (1993) 1685.
- 4) E. Ebert, F. Fauser and M. Iseli: Fusion Technology 1992 (Elsevier Sci. Publ.), Vol. 2 (1993) 1714.
- 5) M. A. Wright, A. Natalizio and T. H. Nguyen: Fusion Technology 1992 (Elsevier Sci. Publ.), Vol. 2 (1993) 1784.
- 6) 日野友明, 広畑優子, 山科俊郎: 真空 38, (1995) 187.

- 6) 日野友明, 広畑優子, 山科俊郎: 真空 38, (1995) 187.
- 7) S. Ergun and M. Menster: "Chemistry and Physics of Carbon" Vol. 1, Chap.4 Marcel Dekker, Inc., New York (1968)