

1号機格納容器の破損箇所・大きさ・形状の推定 と原子炉収束方法

東北大学 流体科学研究所 圓山重直
(2012//12/26 作成)

概要

福島原発1号機の熱流動現象解析により、原子炉格納容器（PCV）の破損状況、破損時間、破損箇所の推定を行った。また、東京電力が2012年10月10日に測定したPCV内の水位データを基にして現在の破損状況を推定した。

これらの解析から大胆な推論を展開し、格納容器は、PCV下部の拡張ベローズの破壊が推定され、その亀裂の大きさは幅数メートル、幅数ミリメートルと予想した。現在は、その亀裂から毎秒1.4リットルの水が漏れ出ている。この大胆な推定が正しいと仮定した場合の原子炉収束の方法についても論じた。

1. はじめに

著者らは福島原発事故直後から事故解析と早期収束の提言を行ってきた [1]。さらに、それらの事故解析を分かりやすく記述した小説も出版した [2]。事故当初からの解析[1]では、早くから原子炉格納容器の破損を予測していた（文献[1]の HTC Rep.14.2, 2011/5/11、以下(HTC Rep.14.2, 2011/5/11)と記す）。その時の開口面積を「等価直径」で 81mm と推定した。破損部は円形であることはなく、筆者はあくまでも分かりやすい表現を使ったが、東京電力（TEPCO）も 5 月 25 日に直径 7cm 相当の穴が開いていると発表している。他の号機の破損状況についても(HTC Rep.14.2, 2011/5/11)で推定しているが、TEPCO は後日それを追認した形で压力容器（RPV）と格納容器（PCV）が破損している可能性があることを発表した。開口部の大きさも当方の発表と類似で、破損部の開口面積を直径で表していることも同じであった。

その後の推定(HTC Rep.17.2, 2011/5/30)では、1号機 PCV 破壊は 3 月 12 日 4:00 と推定した。12 日 15 時 36 分の水素爆発でも開口部の面積が変化しなかったことから、破壊部は PCV 下部であると推定した。TEPCO は PCV の破損部は上部だと推定していたと考えられ、1号機の「水棺」冷却を試みたが失敗に終わったのは衆知の事実である。著者は 1号機の压力容器（RPV）破損推定を行っており[3]、TEPCO の推定とはかなり異なっている。筆者は、構造的に強くできない PCV とサプレッションチャンバーを繋ぐ円筒状の管路途中に設置された「拡張ベローズ」の溶接箇所が破損部位と推定している。それらの解析は、文献[3]に纏めてある。

2012 年 10 月 11 日 TEPCO は号機 PCV にカメラを入れて水位の計測を行った[4]。その結果、水位はドライウエル底部から約 2800mm であることが判明した。これも、破損箇所が PCV 底部であることを裏付けている。

本報では、3 月 12 日の 1号機 PCV 破壊シナリオを纏めると共に、現在の炉心状況から PCV の破損状況を推定する。さらに、これらの破壊面積の推定から、PCV 破壊箇所の形状の推定と今後の事故収束方法の提案を試

みる。

2. 事故当初の1号機格納容器破壊状況

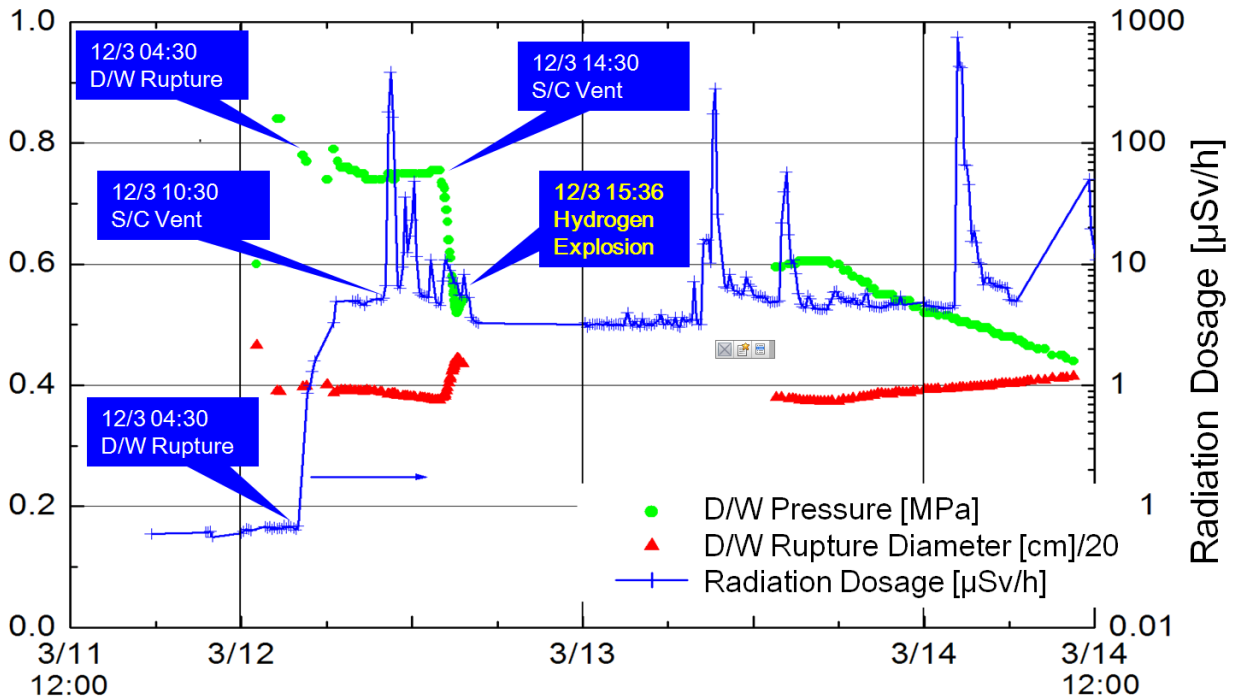


図1 1号機格納容器破壊状況の変化と正門の放射線強度の比較 [3]

図1は、東京電力発表のプラントパラメータによるドライウエル (D/W) の圧力データから、[3]、[5]の手法で推定した格納容器破断面積の等価直径、並びに正門モニタリングポストにおける放射線強度の時系列変化を示している。

図1では、12日4時に放射線量が約100倍に増大し以後しばらく一定になっている。これは、D/W圧力が0.84 MPaから急激に減少した時刻と一致する。このことから、この時刻でのPCV破壊が推定される。図1の破断直径推定では、12日14時のベント直前まで破断面積の等価直径は約8 cmでほぼ一定である。

1号機がベント (S/C Vent) するまで放射線量が一定であることから、一定量の放射性ガスが放出されていると推定される。著者の推定[3]では、12日4時の時点ではRPV内の水位はTAFに達しておらず、ジルカロイ反応は起きていない。従って、放出される放射性ガスも希ガス等のみと推定される。さらに、図1に示す放射線量の上昇は、炉心破壊が起きてから放出している2、3号機の場合と比べて格段に小さい(HTC Rep. 19.2, 2011/10/13)および[5]、[6]。このことも上記の推定を裏付けることになると考えられる。破壊の状況については文献[2]の56頁を参照されたい。

なお、11日21時30分頃に1号機原子炉建屋 (R/B) 内の放射線が上昇したが、外部のセンサーには反応が現れていない。このことは、その時のガスの漏れが少なく屋内に限定されていることを示唆している。

破断面積の推定では、12日12時と13日12時以後の破断面積を比較すると分かるように、ベント時を除き1号機水素爆発の前後で破損面積の変化が認められない。また、爆発後の放射線強度の著しい増加もないことから、爆発の衝撃圧によってPCVの破壊は起きていないことがわかる。

この間、崩壊熱の現象による蒸気放出量に変化しても破断面積が変化しないということは、破断開口部の大きさが一定以上で、レイノルズ数が十分大きく、ベルヌーイの式 (抵抗が速度の二乗に比例する) が適用でき

たことを示している。もし、格納容器上部のフタ部のシールからの微細隙間からの漏れがある場合は、流路抵抗は流速に比例するダルシー則に従うので、このようなデータにはならない。

爆発直後の放射線量の変化を見ると、水素爆発自体による放射能の放出は小さいことが図1から分かる。14時25分の水蒸気の排気筒からの放出は確認されているが、14時のベントによる放射線量は小さいので、ベントガスの逆流による原子炉建屋内放出が疑われる。14時のベントは炉心破壊後であり多量の水素を含んでいる。放射線強度も原子炉建屋に水素が充満したときの放射線量が高く、爆発の瞬間は少し増大するが、直ぐ放射線量が下がったことから、爆発による放射能の放出は限定的であったことが推定される。

爆発前後で破壊面積が変化しなかったこと、および、後に行った水棺作業において格納容器の水漏れが発覚し、1号機の漏水が格納容器下部にあることが明らかとなった。また、格納容器（PCV）と原子炉建屋のコンクリートは完全に密着しておらず、5cm程度の隙間が存在するといわれている。さらに、D/WとS/Cを繋ぐ円筒部は熱応力を回避するために薄いベロー部が溶接で接合されており、ここが強度的に脆弱だといわれている。以上から、破損部はD/WとS/Cを繋ぐ円筒部との溶接箇所またはベロー部が疑われる。2012年10月10日にTEPCOがPCV内部の水位を測定した結果[4]から、水位はD/W底部から約2800mmであることが報告された。この事実も、上記の推定を裏付けるものとなっている。

3. 現在の1号機格納容器状況推定

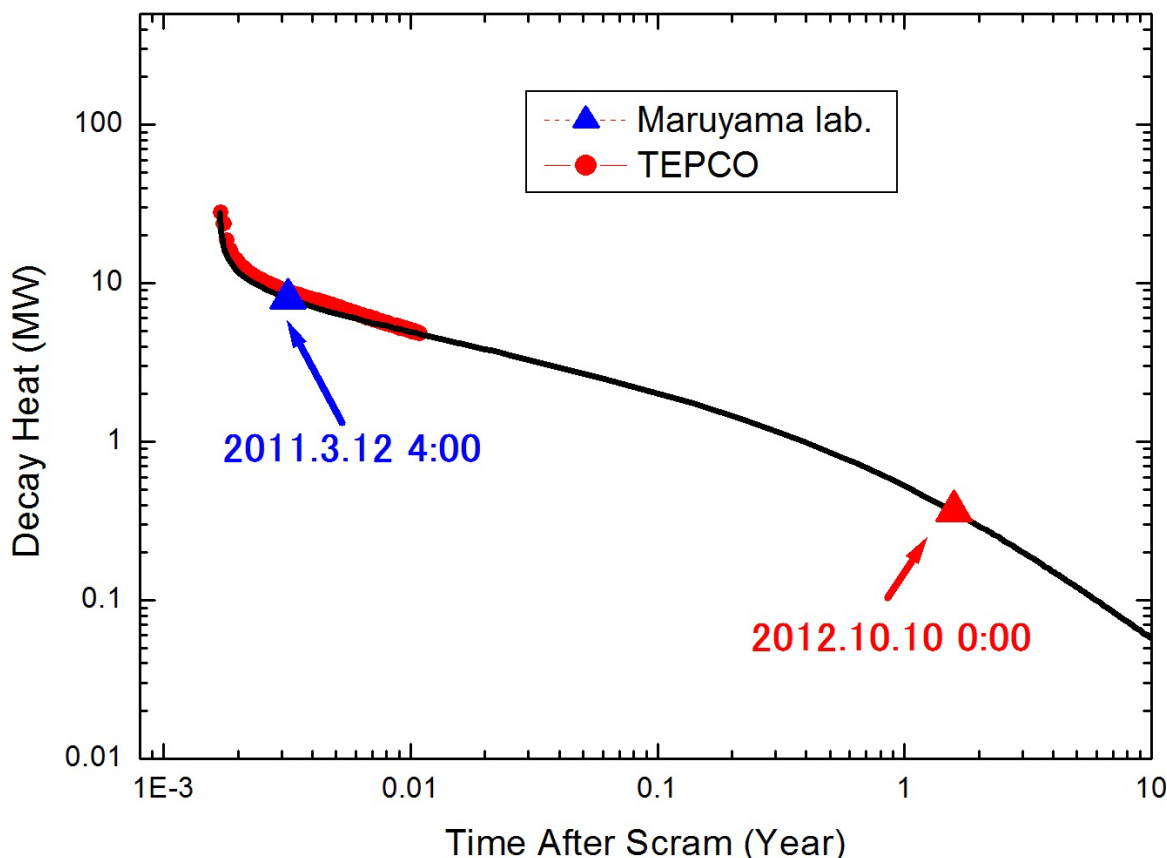


図2 1号機崩壊熱の変化とTEPCOデータとの比較

図2は[3]で推定した崩壊熱の時系列変化を示している。図中には東京電力（TEPCO）の公開データの崩壊熱との比較を示す。両者は比較的よく一致している。格納容器が破壊した2011年3月12日4時での崩壊熱は70MW

であったが、TEPCOが内部を測定した2012年10月10日時点での崩壊熱は0.36MWまで減少している。つまり、現在は2011年3月12日4時に比べて発熱量が1/20に減少していることから、原子炉内部の熱流動は事故当初と大きく異なっていると考えられる。

表1 2012年10月10日5時の1号機プラントパラメータ

原子炉注水量	50m ³ /h
原子炉压力容器底部温度	33.9℃－34.4℃
格納容器内温度（戻りガス温度）	36.2℃
格納容器圧力	106.7kPa abs
窒素封入量	32.41Nm ³ /h
格納容器からのガス排気流量	26.65m ³ /h
使用済燃料プール水温	24.5℃

表1は2012年10月10日のプラント関連パラメータを示している。この時点では原子炉はヘアド라이어300台分の熱しか放出していないため、これによって作られた蒸気は格納容器壁面で凝縮し水となっている。事故当初は格納容器からは水蒸気が環境中に放出されていたと考えられるから、状況は大きく異なっている。つまり現在は、格納容器破損箇所から毎秒1.4リットルの水が漏れていることになる。この量は、水道の蛇口を全開した程度で、原子炉の大きさを考えると、それほど多い量でないことが分かる。因みに、崩壊熱を全て蒸気にした場合に必要な水量は毎秒0.16リットルであるから、注水はそれに比べて10倍程度の量が投入されていることが分かる。

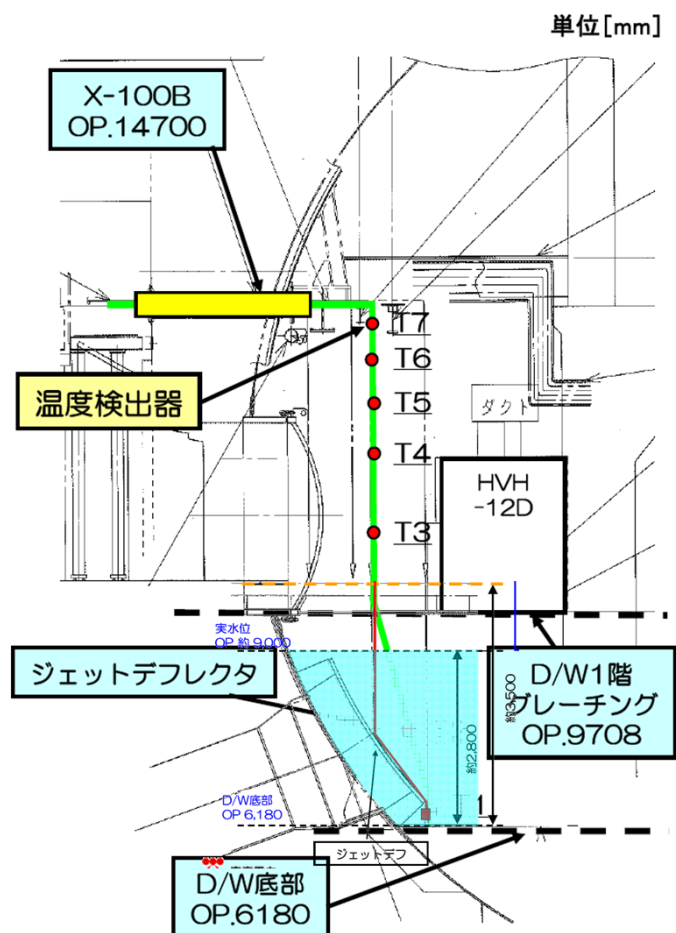


図3 格納容器の水位計測結果 [4]

図3は、TEPCOが観測した格納容器水位の状況を示している。図3はその後発表された格納容器の詳細図と合成して浸水領域を示している。TEPCOの発表ではD/W底部から約2.8mの水位があったと報告されている。水は格納容器の破損箇所から漏れていることから、破損箇所はこの水位以下の場所に存在することが分かる。図3のジェットデフレクターから伸びている管路（D/WとS/Cの接続パイプ）の先に、拡張ベローズがあるのでその破損が疑われる。

4. 現在の格納容器破断面積の推定

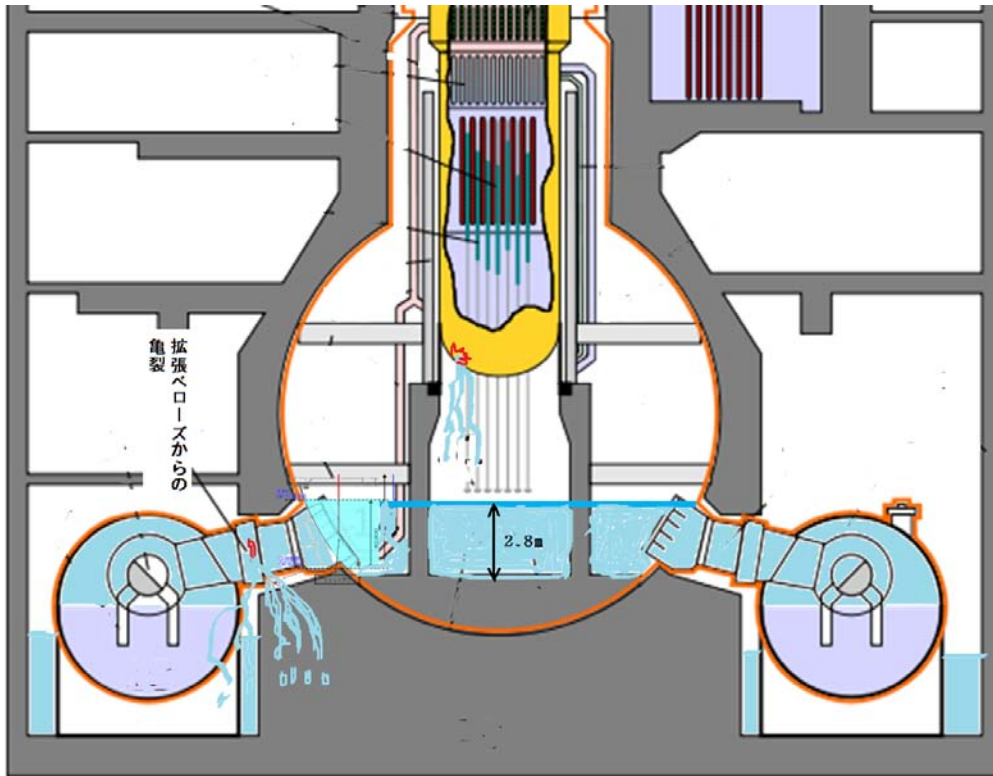


図4 2012年10月10日時点での1号機の破壊状況推定

筆者は原子炉格納容器の正確な図面を入手できない。そこで、公開されている原子炉概略図に図3の水位状況を合成して原子炉破損状況の推定図を作成した。図3の推定からD/WとS/Cの接続パイプ直径は1.7m程度であるから、拡張ベローズの直径は2.1m程度と推定される。図4を見ると拡張ベローズの下端はD/W底部とほぼ同じ位置だから、拡張ベローズが破損していると仮定すると、破損部は格納容器水面から0.2~2.8m下に存在することになる。これはあくまでも公開図面を用いた推定なので、実際の値とは値が異なるかも知れないが、大きな差異はないと考えられる。

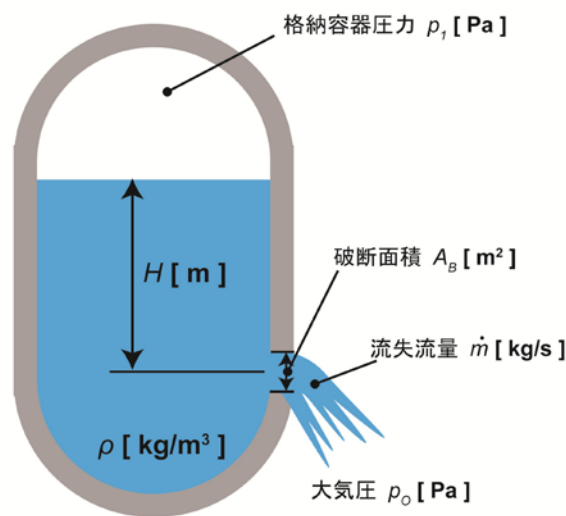


図5 格納容器破断面積解析モデル

図5に示す解析モデルと工学部の学部で教える流体力学を使うと、現在の格納容器破断面積 A_B が次式で計算できる。

$$\dot{m} = 0.6A_B \sqrt{2\rho (p_1 - p_0 + \rho gH)} \quad (1)$$

ここで、オリフィスの流量係数は0.6とした。亀裂の大きさは水深0.2mと2.8mの場合で、それぞれ6.03cm²と2.86cm²になる。事故直後の破壊面積の計算では、直径が約8cmつまり破断面積が50cm²と推定された。現在はこれよりかなり小さくなっているのはなぜだろうか。この原因について以下に考察する。

冒頭でも述べたように、PCVの破断開口部は円形ではなく亀裂であると考えられる。事故から1年半以上経過し、その間、原子炉には海水やダムからの淡水が継続的に注水された。それらの水は種々のゴミ等が含まれていることは容易に推定できる。4号機プールの画像でも色々な浮遊物や付着物が確認されている。炉心や格納容器内もこのようなゴミが存在し、それが破損部に引っかかり目詰まりを起こしていることは容易に推察できる。また、炉心は溶融破壊しているので燃料棒などからの粉末ウランなどが詰まっていることも考えられる。また、事故当初に比べるとPCVの圧力が小さいので、その分だけ開口部が縮小状態なのかも知れない。ゴミ等が引っかかるためには、亀裂は正方形や円形ではなく、幅数ミリの長い亀裂が存在すると考えるとおつじつまが合う。

一方、事故初期にベルヌーイの式が成り立つためには隙間はある程度の大きさである必要がある。事故当時のパラメータを検討すると、幅1mmの亀裂でもレイノルズ数は10⁵以上であり、この仮定は成立することが分かる。拡張ベローズの亀裂は溶接箇所の際に円周状に伸びていることが推定される。もし、亀裂が拡張ベローズ全周に渡れば、亀裂幅は0.75mmとなる。しかし、この場合連結管路が破断し開口部はもっと大きくなることになる。このことから、亀裂は全周にわたっていないと推定される。

つまり、亀裂幅はゴミ等が引っかかりやすい数ミリの幅で発生していることが推定される。例えば、亀裂長さが1mだと幅は5mm、長さが2mだと幅2.5mm程度となり、この割れ目から水がチョロチョロと漏れだしていることが考えられる。

関係各位は、筆者の入手できない情報や図面を保有しているので、上記の推論を参考にして、もっと正確な推定が可能ではないだろうか。

5. 原子炉収束のための方策

もし筆者の大胆な推定が正しければ、上記の破壊部位と大きさの推定は原子炉の収束に大きな手がかりを与える。つまり、拡張ベローズの破断箇所を特定すれば、溶接等で格納容器の漏れを塞ぐことが出来るのである。以下に原子炉を収束させるための方策を提案する。2号機と3号機の格納容器破断箇所も類似の拡張ベローズの破壊が推定されるので、本報の収束方法は他の原子炉収束にも使える可能性がある。

(1) 先ず、D/WとS/Cを接続する筒は8カ所あるので、そのどれから水が漏れ出ているかを特定するために、既存のロボットを使って確認する。次に格納容器の破損箇所を特定するためにどの拡張ベローズが破損しているか専用のロボットを開発し、それを使って特定する。拡張ベローズのどの部分にどのくらいの長さの亀裂があるか写真撮影等で特定する。キャットウォークから接続筒にはい上り、破損箇所を特定する特殊なロボットを開発する必要があるかも知れない。

(2) 格納容器の水をくみ出し、原子炉圧力容器に注水する管路とポンプを設置する。この設備には冷却する装置はならず、ただ水を循環するだけでよい。崩壊熱で発生した蒸気は格納容器壁との熱交換で水に凝縮す

る。ただし、この装置をつけずに注水だけを止めてPCVを塞ぐとRPVに入っている核燃料が高温になり危険である。著者は燃料の大部分はRPV内に留まっていると推定している[3]。

(3) 上記の設備が出来てから、溶接ロボット等で破損箇所を塞ぐ。この特殊ロボットの開発には時間がかかるので、早め着手する。このロボットは同様の破損箇所を持つと推定される2号機と3号機にも使える可能性がある。

(4) 破損箇所を塞いだら(2)の装置を稼働して炉心の冷却を行う。この処置によって外部への漏水と放射能漏れは止まるので、1号機に関しては、長大な管路を持つ「循環注水冷却システム」を使う必要がなくなる。また、タービン建屋の解体や原子炉建屋地下の水くみ上げも可能となる。詳しくは、[2]の239-240頁を参照されたい。

(5) 格納容器が塞がったら、容器全体を水で見たし、上部のフタを開けてRPV内燃料取り出しの準備を開始する。

上記の手順は2号機および3号機にも適用できる可能性がある。

参考文献

- [1] 東北大学流体科学研究所 圓山・小宮・岡島研究室、“福島第一原子力発電所事故の熱解析と収束プランの提案” <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/~maru/atom/index.html>、(2011-2012).
- [2] 圓山翠陵、小説 FUKUSHIMA、養賢堂 (2012-9)
- [3] 円山重直、“福島第一原子力発電所1号機事故の熱流動現象の推定—非常用復水器が作動していた場合—”，保全学，Vol.11，No.3，(2012-10)，pp. 93-99.
- [4] 福島第一原子力発電所1号機原子炉格納容器内部調査結果について、平成24年10月11日、東京電力株式会社、(2012-10)
- [5] 円山重直、福島第一原子力発電所2号機事故の熱流動現象推定(熱力学モデルによる事故シナリオの検証)、日本機械学会論文集 B編、(2012-12)
- [6] 円山重直、“福島第一原子力発電所3号機事故の熱流動現象の推定—高压注水系(HPCI)が途中で止まった場合—”，保全学，Vol.11，No.3，(2012-10)，pp. 100-109.