

Mark-I 格納容器の炉心損傷割合の評価手法について

1. はじめに

2号機は、地震により直流電源を喪失したにもかかわらず RCIC の運転が継続したため、2011年3月14日の9時ごろまでは炉心を冷却できている状態にあった。そのため、同日朝に復旧された格納容器内の線量を測定する CAMS により、炉心損傷前と後の格納容器内の線量変化をとらえることができている。その測定値の事故進展とのかかわりについては、課題2号機-12として設定しており、(添付資料2-10)2号機の15日の CAMS 測定値の急上昇について、および、(添付資料2-11)2号機14,15日に測定された CAMS 測定値から推定する FP 移行挙動について、にて検討を実施してきた。

これらの検討結果、および、その他の2号機の事故進展に関する結果から、2号機の炉心損傷は1,3号機同様にほぼ100%炉心損傷に至っていたと推定されている。一方で、事故当時はこの CAMS の測定値を用いて、炉心損傷割合の評価もなされており、例えば、2011年4月27日に公表された2号機の炉心損傷割合の数値は35%となっており、事故進展から推定される炉心損傷の程度と、事故前に用意されていた CAMS 測定値から評価される炉心損傷割合(図1参照)が大きく異なっていたように見える。(同じ公表において、1号機は55%、3号機は30%と評価されている。)また、1~3号機における共通の傾向として、2号機の炉心損傷前の測定値を除くと、図2に示す通り D/W の CAMS の測定値と比較して、S/C の測定値がかなり小さい値になっていることが確認できる。

2011年の事故当時は、CAMS の線量測定はシビアアクシデントの操作手順を適用するための判断や、炉心損傷割合を評価するものであったため、シビアアクシデントの事故収束に向けての重要なパラメータとされていたことから、本資料では、上記のような実際の事故進展と CAMS の測定値が異なる傾向を示しているように見える要因について検討を行った。

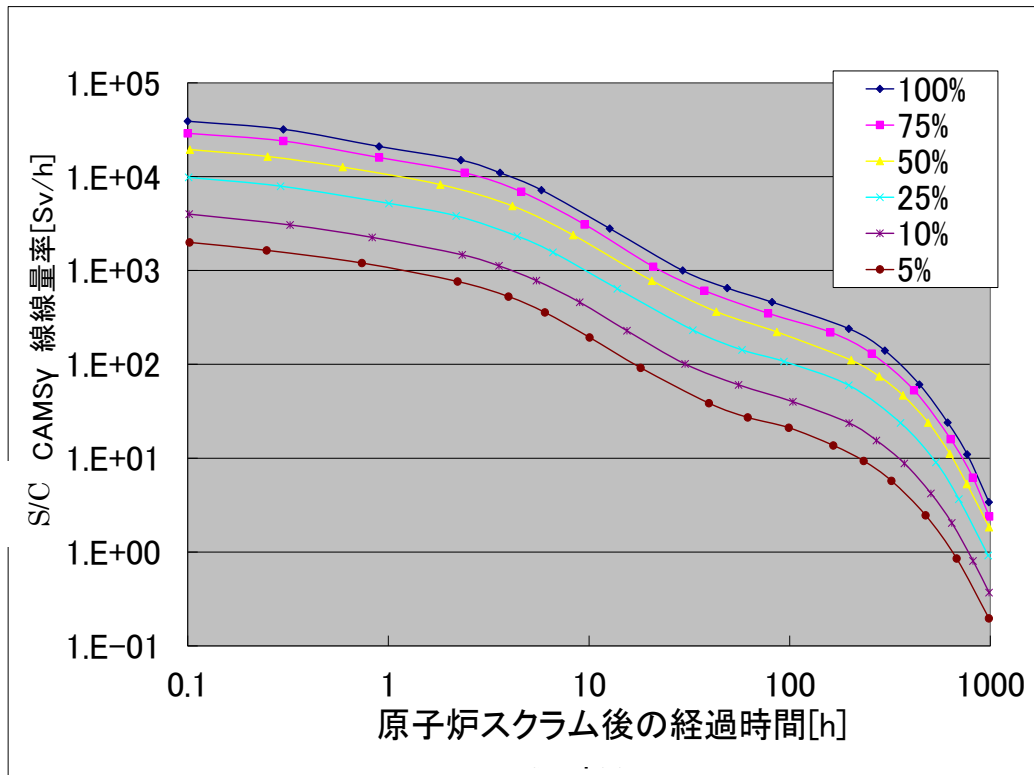
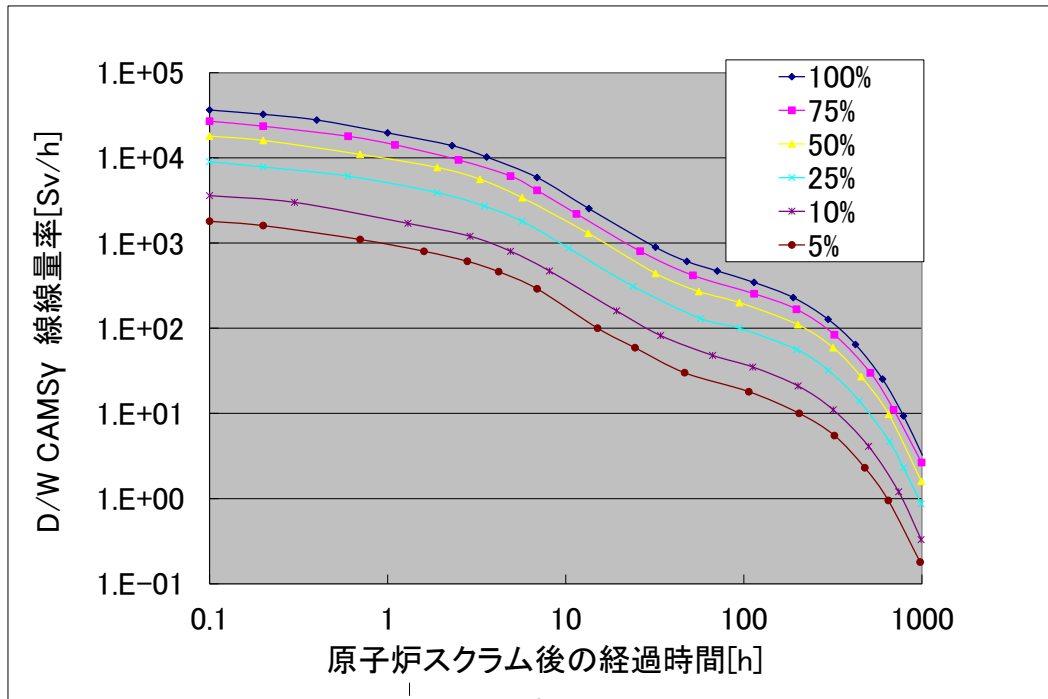


図1 2号機の炉心損傷割合のマップ (BWR4 共通)
 (上段) スクラム後の経過時間と D/W CAMS の測定値と炉心損傷割合の関係
 (下段) スクラム後の経過時間と S/C CAMS の測定値と炉心損傷割合の関係

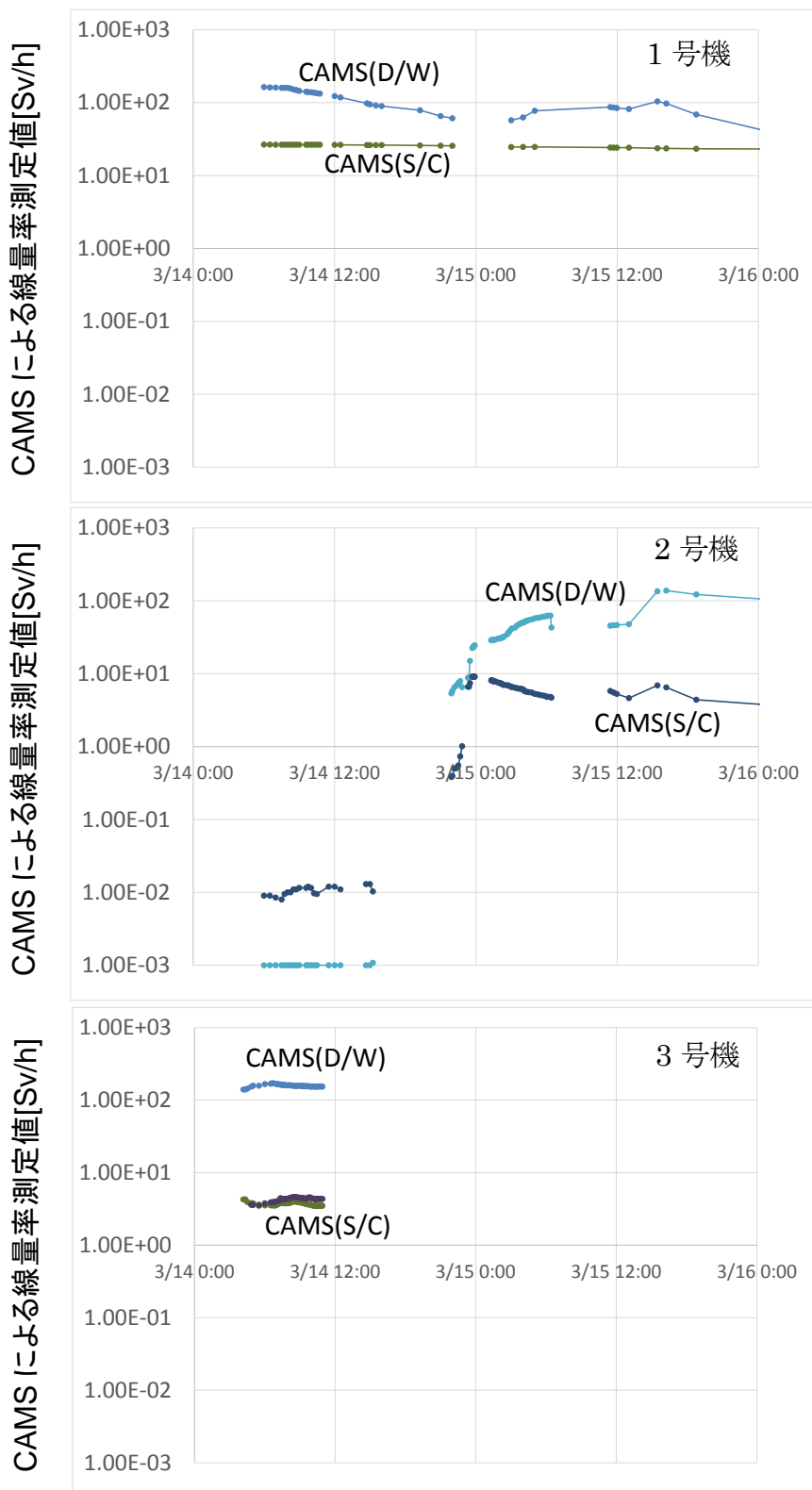


図2 1~3号機のCAMsによる線量測定値

2. CAMS による線量率測定値と炉心損傷割合の関係

図 1 に示す CAMS による線量率測定値と炉心損傷割合の関係は事故前に整備されたもので、燃料棒が破損し、その中に閉じ込められていた放射性物質が格納容器に移行すると事故進展を想定し、その際の格納容器内の線量率により、燃料棒から放出された放射性物質を推定するものであった。なお、燃料破損時に燃料棒から放出される放射性物質は、希ガス、ヨウ素、セシウム等が考えられるが、保守的に炉心損傷を判断するとの観点から、希ガスのみが放出されたと想定し、より低い線量率で炉心損傷を評価するものとされてきた。

また、放射性物質は時間とともに崩壊により減少していくため、同じ線量率でも、スクラム後からの時間が遅いほど、大きい炉心損傷割合とするように時間依存で CAMS による線量率測定値と炉心損傷割合の関係が決定されている。

線量率は周囲に存在する放射性物質からの放射線がある点に届く量として計算することができるが、この関係図の作成においては、D/W および S/C の自由空間体積に相当する体積を持つ半球を想定し、その球の中心部分に測定点を置いた場合の線量率を計算する形で求めている。これはいわゆる半球モデルというもので、線量率計算に古くから用いられている一般的なものである。

3. 事故時に測定された線量率と炉心損傷割合の評価値との関係

図 3 に、3 月 14 日から 3 月 16 日にかけて測定された 2 号機の D/W および S/C の CAMS の測定値を示す。前述したように、炉心損傷前の 3 月 14 日の 12 時ごろから 16 時ごろにかけての線量率測定値を除き、炉心損傷に至った後と考えられる 3 月 14 日夜からの測定値は、いずれも S/C の CAMS の線量率測定値の方が 1 桁程度低い値となっている。2 号機の事故進展の経緯からいうと、原子炉が破損していない状態で炉心損傷に至っているため、当初は燃料棒から放出された放射性物質は SRV を経由して S/C に放出され、その一部が D/W にも移行するというものである。その後は原子炉が破損することで原子炉から D/W へ放射性物質が直接放出されることで D/W にも多くの放射性物質が移行するため、事故進展の特徴からは、まず S/C の線量率が上昇し、途中で D/W の線量率が逆転するとの傾向となることが予想されるが、実測値においては、S/C の CAMS の線量率測定値は一貫して D/W よりも低くなっている。

図 4 に 2 号機における D/W および S/C の CAMS の線量率検出器の設置位置を示す。D/W の検出器は、ペネトレーション内に設置され、格納容器の内部ではないものの、すぐ近傍で線量率を測定するようになっている。一方で、S/C の検出器は、ドーナツ型の S/C に直接設置されるわけではなく、S/C が設置されているトラス室の壁に固定される形で設置されている。一方で、炉心損傷割合の評価に使用されている線量率の測定値は、図 5 の右側に示すように、線量率

検出器の真上に S/C の自由空間体積と同じ体積を持つ半球が存在し、その中に希ガスが充満している状態で、その線量率がいくつになるかという計算を実施したうえで設定されている。しかしながら、現実の条件では、放射性物質はドーナツ状の形状の S/C の上部の領域に希ガスが充満し、希ガスから発する放射線は、一部が D/W やその他の構造物によって遮蔽され、また、S/C そのものよりも少し離れた場所に設置されていることともあいまって、実際に測定される線量率は炉心損傷割合の評価に使用される図の線量率と比較して、小さいものとなった可能性が高い。

添付資料 2-11 において、CAMS により測定した線量率に対し、CAMS の設置位置等の幾何形状を考慮したモンテカルロ計算により S/C 内の放射性物質の分布を推定している。地震発生後から約 80 時間後に相当する、3 月 14 日 23 時 54 分の測定値 9.1Sv/h は

- ① 希ガスの FP はそのまま S/C の気相部に移行して線源となる
 - ② ヨウ素やセシウム等の揮発性 FP は大部分が水にトラップされ水中線源となる
 - ③ 気相に移行した揮発性 FP の一部は S/C 内側表面に付着して線源となる
- の 3 つの線源からの寄与を合計したものとなるが、この評価によれば、①の線源である希ガスによる寄与は多めに見積もっても、1.2Sv/h となるとの評価となっている。一方で、炉心損傷割合の評価においては、100%全放出を考慮すると、希ガス成分からの放射線のみで、81.8 時間後に 460Sv/h、197.4 時間後でも 240Sv/h 程度となっており、炉心損傷割合を評価するとの目的と比較すると、CAMS の線量率検出器の設置場所と評価方法が実際の状況と不整合であることから、大幅な過小評価になることがわかった。

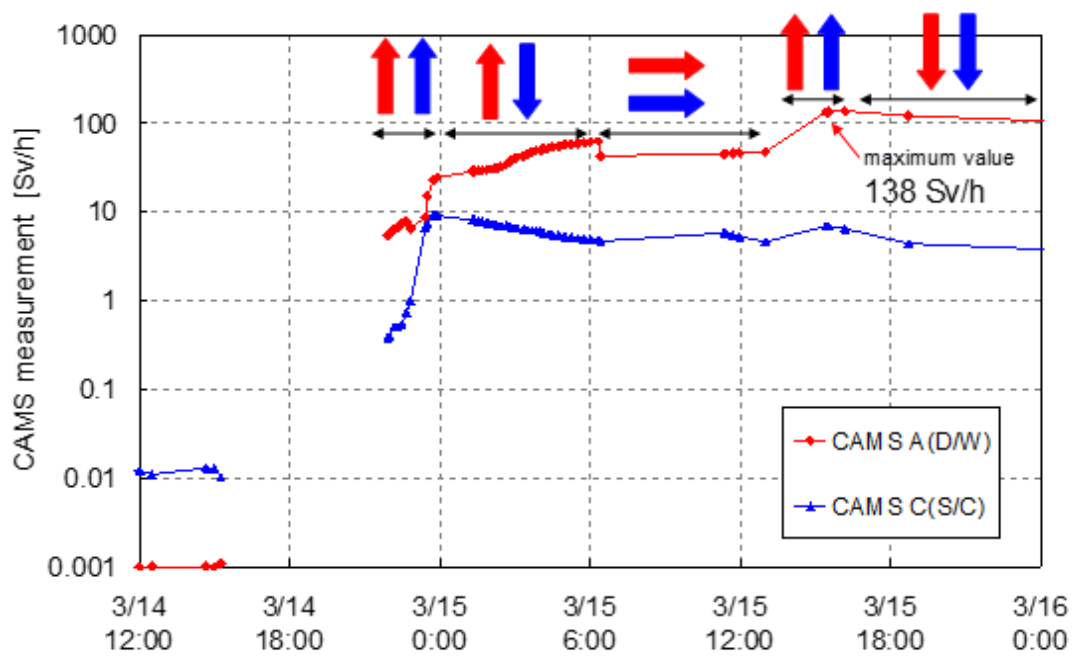


図3 D/W と S/C に設置された CAMS による線量測定値

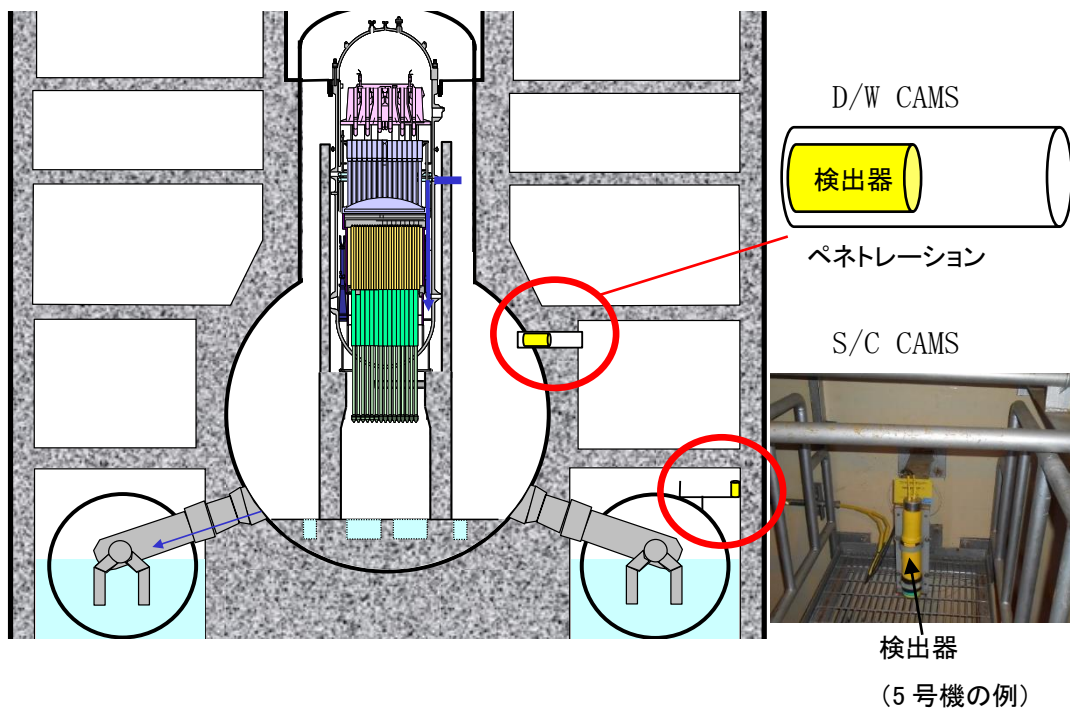


図4 D/W および S/C の CAMS の線量率検出器の設置状況

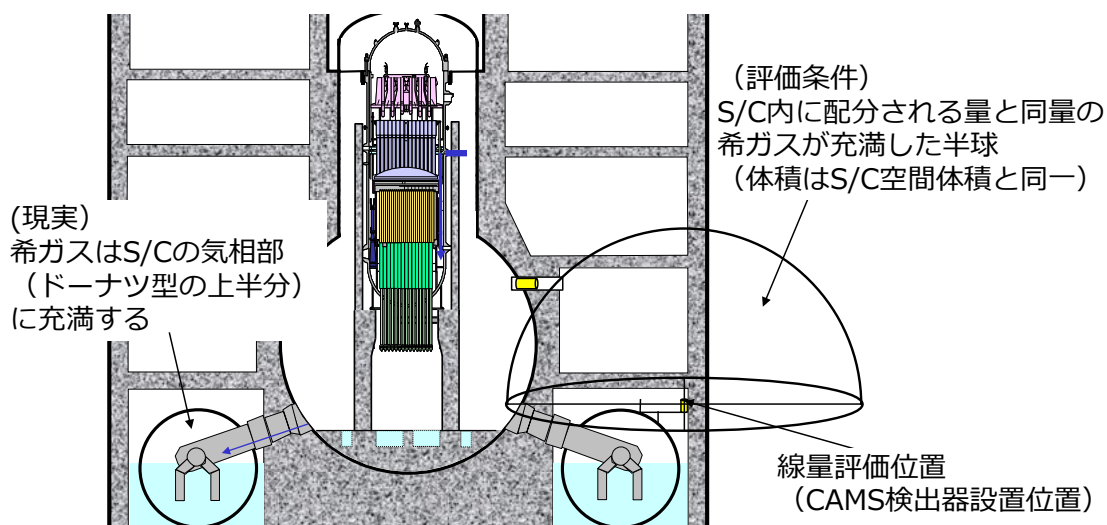


図 5 CAMS の線量率測定の実際と評価の相違

4. まとめ

事故時に測定された S/C の CAMS の線量率の測定値とそれを用いた炉心損傷割合の評価値の関係に不整合があることから、評価手法にさかのぼって検討を実施した。事故前に整備された炉心損傷割合の評価手法と実際に設置された線量率検出器の設置位置との比較から、2号機のような Mark-I 格納容器を採用したプラントにおいては、炉心損傷割合を非保守側（損傷を割合を小さく）評価する可能性が高くなるとの傾向があることがわかった。

5. 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策との関係

本検討より、Mark-I 格納容器について図 1 に示す CAMS 線量率測定値と炉心損傷割合の関係（以下、評価マップという）から CAMS 線量率を用いて炉心損傷割合を評価する場合、過小評価となる傾向があり、これは Mark-I 格納容器の幾何形状および CAMS 検出器の設置位置による影響を適切に反映していないことによるものであると推定した。このため、CAMS 線量率から炉心の状況を推定する際には線源と CAMS 検出器の間の遮へいや距離による減衰を適切に考慮する必要がある。

柏崎刈羽原子力発電所の運転操作手順では、炉心損傷の判定に評価マップを用いており、以下の理由から判断基準として妥当であると考えている。

- ・ 柏崎刈羽原子力発電所 6 号機及び 7 号機の CAMS 検出器は D/W、S/C いずれも格納容器の貫通部内に設置されている（図 6 参照）。
- ・ 炉心損傷の判定基準とする線量率は判断の遅れが無いよう保守的に低めの値を採用している。

- ・炉心損傷時には線量率が短時間に大きく上昇することから、炉心損傷判定曲線の不確かさによる炉心損傷の判定時間への影響は小さい。

なお、従来、炉心損傷割合は運転員が行う運転操作の判断に用いていない。また、事故時に運転員に対して技術的な支援を行う組織（技術支援組織）が参照するマニュアルでは、従来、評価マップを用いて炉心損傷割合を算出することを定めていたが、現在では当該運用は廃止している。

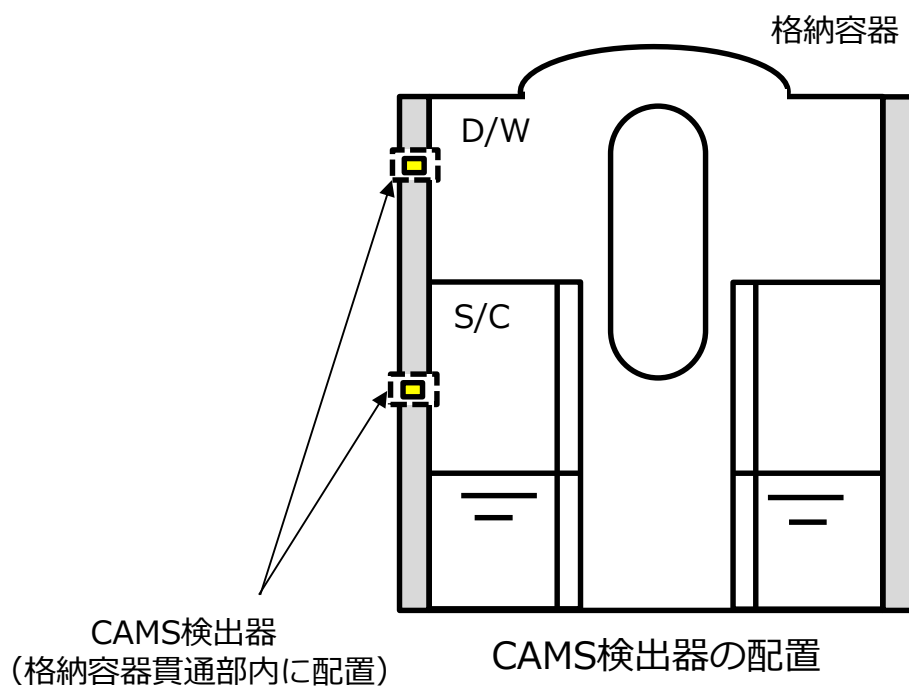


図6 CAMS 検出器の配置