

スクラム失敗事象におけるホウ酸投入の措置について

令和 2 年 10 月 27 日
日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所

【R2.9.28 審査会合コメント】

BDBA 時のホウ酸投入に係る想定シナリオを明確にし、ホウ酸投入作業を行う前提条件を示すこと。また、事象発生時にこれらの条件・状況を確認する方法を示すこと。

原子炉運転中に地震等の何らかの原因により、原子炉を停止する必要があるにもかかわらず、制御棒の固着や重水ダンプ失敗などにより期待した負の反応度を入れることができない場合に、ホウ酸を投入することとしている。このホウ酸の投入は、原子炉を臨界状態から未臨界状態にし出力を安定的に低下させ、燃料の破損に至らないようにすることによって多量の放射性物質の放出事象の発生を防止するための対策である。

最も厳しい仮定として、原子炉の臨界状態が維持された状態で 1 次冷却系による強制循環冷却が維持されている状態において、全制御棒が固着し重水ダンプも一切働かない場合においても、原子炉を未臨界にできるようなる。

定格出力 20MW で運転中の原子炉を未臨界にする（実効増倍率 k_{eff} を 1.0 未満とし臨界状態を維持できなくする）ためには、減速材温度効果及びドプラ効果（原子炉の出力が低下することにより減速材である 1 次冷却材の温度や燃料の温度が低下した場合に反応度が正の方向に働く効果）を考慮すると、必要な負の反応度は約 $0.6\% \Delta k/k$ である。炉心上部からホウ酸を投入した場合、炉心上部から 1 次冷却系統内に吸い込まれ拡散されることから（別図 1、2 参照）、必要な負の反応度を印加するには冷却材中のホウ素の濃度を約 45ppm とする必要がある。これに必要なホウ酸の量は、約 70kg（ホウ素の同位体比が天然のホウ酸）、約 14kg（ホウ素の同位体比が天然の 5 倍のホウ酸）と算出している。（参考資料参照）

《ホウ酸投入の前提条件》

前述のとおり、原子炉を未臨界とし燃料の損傷を防止するためのホウ酸投入の前提条件は、以下ようになる。

- ・ 制御棒の挿入及び重水ダンプが完全に行われず、原子炉を停止するための負の反応度が十分に印加されず、出力の低下が小さい場合。（十分な反応度が印加された場合は、出力の低下が大きくなるためホウ酸投入の必要がない。）
- ・ 1 次冷却系による強制循環冷却が維持され、燃料の健全性が維持されていること。

本スクラム失敗事象に合わせて、1 次冷却系による強制循環冷却まで機能を喪失した場合は、瞬時に燃料の損傷が発生するものと考えられ、燃料損傷事象発生時の対策（影響緩

和モード)に移行し、放射性物質を閉じ込める対策を講じる。

《原子炉の運転状態の確認方法》

炉心の冷却、モニタの指示値などのプロセス量の監視は、制御室から常設の監視計器にて確認できる状態にあり、また1次冷却系による強制循環冷却の状態が維持されていることは1次冷却材流量低(定格流量(2,400m³/h)の90%)及び1次冷却材炉心出口温度高(42℃以上)の警報が発報していないことで確認ができ、燃料が健全な状態であることこの確認は燃料事故モニタ高(定格出力20MW運転時のバックグラウンドの2倍)の警報が発報していないことで判断できる。

《ホウ酸投入の際の環境》

燃料が健全な状況であれば、ホウ酸投入に係る作業場所である炉頂部は通常運転時の放射線環境にあるため、作業は可能である。

仮に、停止機能を喪失し、1次冷却系による強制循環冷却と燃料の健全性が維持された状況においてホウ酸の投入にも失敗し臨界状態を維持したとしても、長期的には時間経過とともに燃料の燃焼に伴い臨界を維持するための反応度が不足するため、臨界を維持することができず原子炉は停止する方向へ向かうものと考えられる。

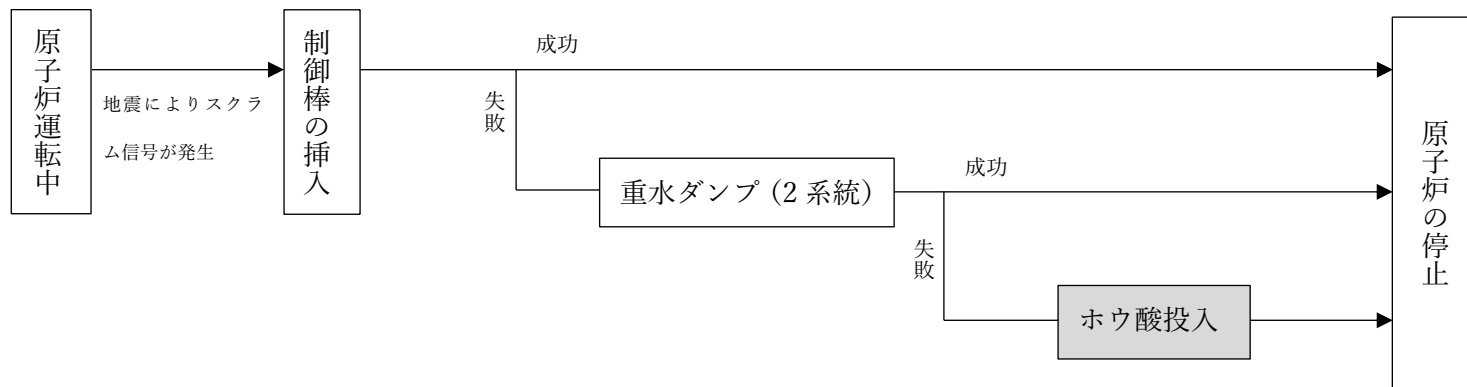
以上を踏まえ、ホウ酸投入に係る判断基準を追加する補正を行うこととする。

別表第29 多量の放射性物質等を放出する事故に関する措置(第5条の2第1項関係)(抜粋)
(変更前)

発生事象	判断基準	措置
全ての停止機能が喪失した場合	・全制御棒が挿入不可状態であることを確認した後、重水ダンプ弁の開操作を行い作動しないとき。	①炉頂部よりホウ酸を原子炉プールに投入する。

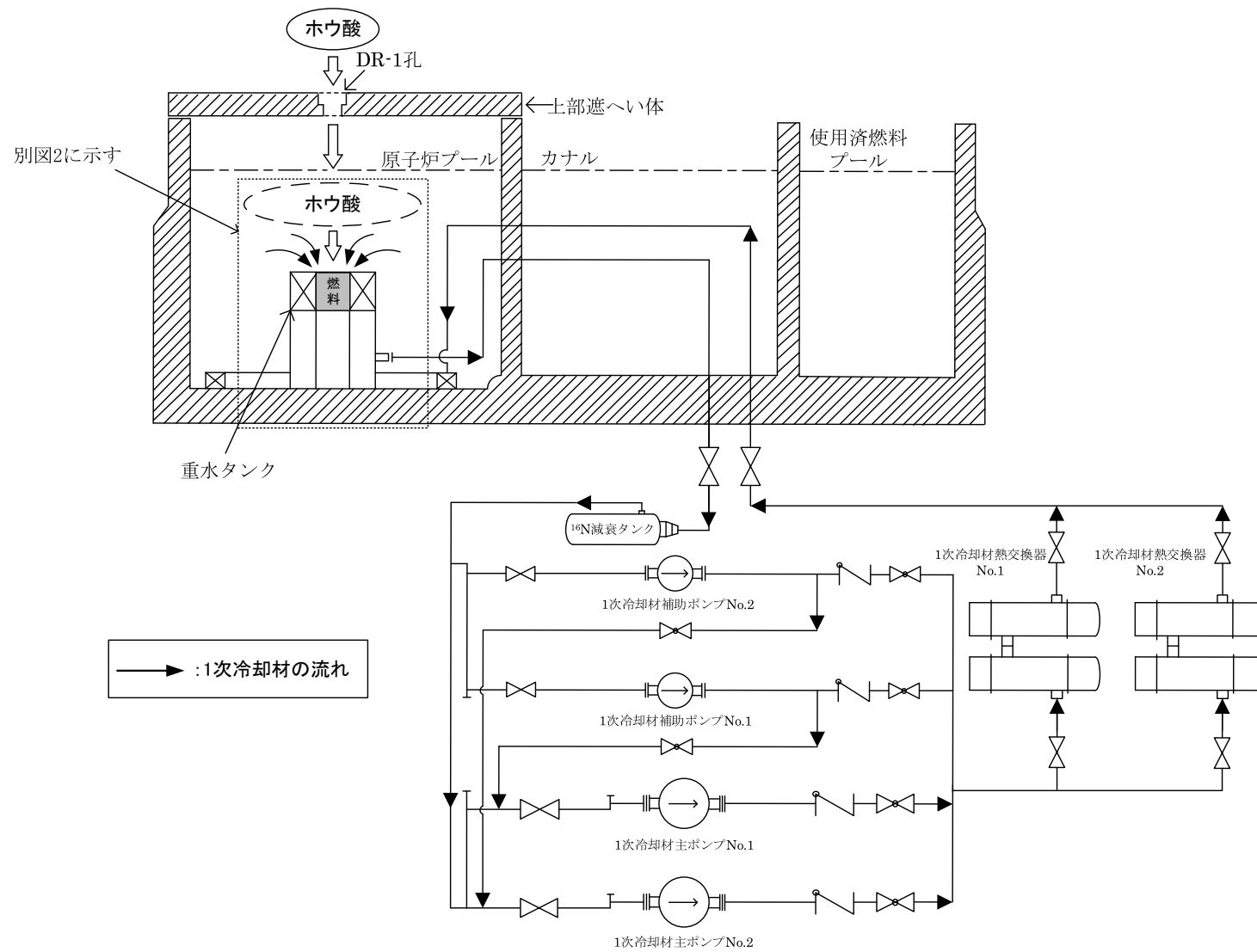
(変更後)

発生事象	判断基準	措置
全ての停止機能が喪失した場合	・全制御棒が挿入できないこと及び、 <u>重水ダンプ弁の開操作ができないことを確認した後、以下の警報が発報していないとき。</u> <u>[強制循環冷却の維持]</u> ① 1次冷却材流量低 ② 1次冷却材炉心出口温度高 <u>[燃料の健全性]</u> ③燃料事故モニタ高	①炉頂部よりホウ酸を原子炉プールに投入する。

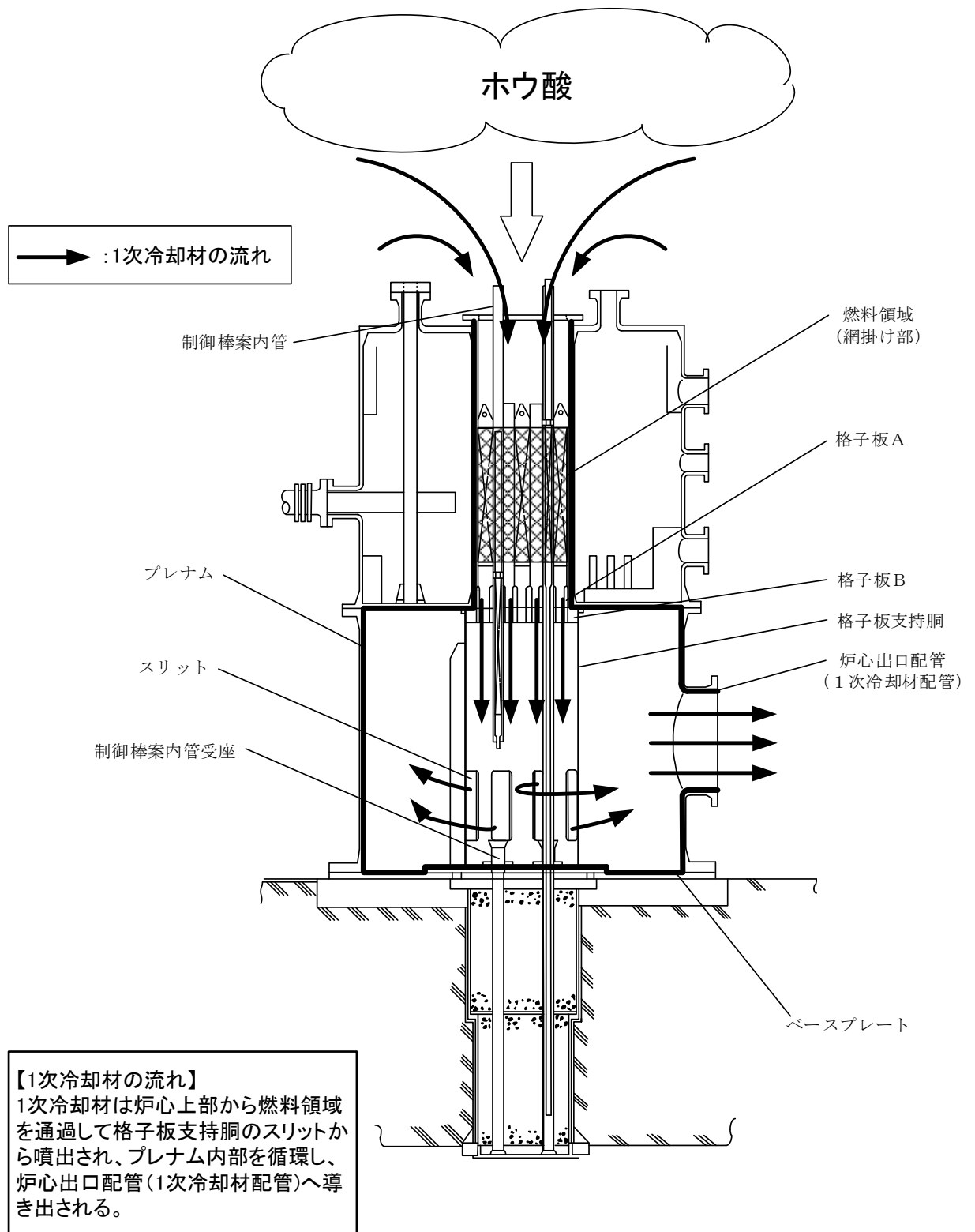


スクラム失敗事象発生時のホウ酸投入に係るフロー

別図1



ホウ酸の流路概要図（全体）



ホウ酸の流路概要図 (炉心部)

必要となるホウ酸量について

原子炉を未臨界にするために必要な負の反応度は、減速材温度及び燃料のドプラ効果を考慮すると $0.6\% \Delta k/k$ である。1 次冷却材中に均一にホウ酸が拡散しているとした場合、必要なホウ素濃度についてモンテカルロコード MVP を用いて計算した結果、約 45ppm となる。1 次冷却材全量 (253m³) がこのホウ素濃度になるために必要なホウ素量は

$$253 \times 10^3 \times 45 \times 10^{-6} = \underline{11.385 \text{ kg}}$$

となる。天然のホウ酸におけるホウ素含有率は約 17.4wt% であることから、原子炉停止に必要なホウ酸の量は

$$11.385 \text{ kg} / 0.174 = \underline{65.4 \text{ kg}}$$

となる。ここから設置変更許可時の説明では保守的に約 70 kg とした。

現在は、天然の同位体比の 5 倍のホウ素濃度である濃縮ホウ酸を使用することとしたため、原子炉停止に必要な濃縮ホウ酸の量は約 14 kg となる。