

Th 溶融塩炉のフェイルセーフ

SCE・Net

西村二郎

R-88

2022年12月18日

1. はじめに

福島原発の事故後、東電の関係者の責任を問う裁判では、検察審査会の強制起訴案件を含めて「事故は予見できたとはいえない」として無罪となった。

経済性を要求される原発に対して、確率的事象である地震の規模を問わず安全性を保証することは現行の軽水炉では不可能であることが明らかとなった。

一方、化学工学から出発した安全工学では、フェイルセーフが原則である。電源が落ちたときプラントは非常停止をし、その後、安全に推移するのである。

事故が起きたときの影響が重大な原発に、フェイルセーフは不可欠な原則である。

この報告では、Th（トリウム）溶融塩炉による原発を対象として、電源喪失時のフェイルセーフ性を展望してみた。

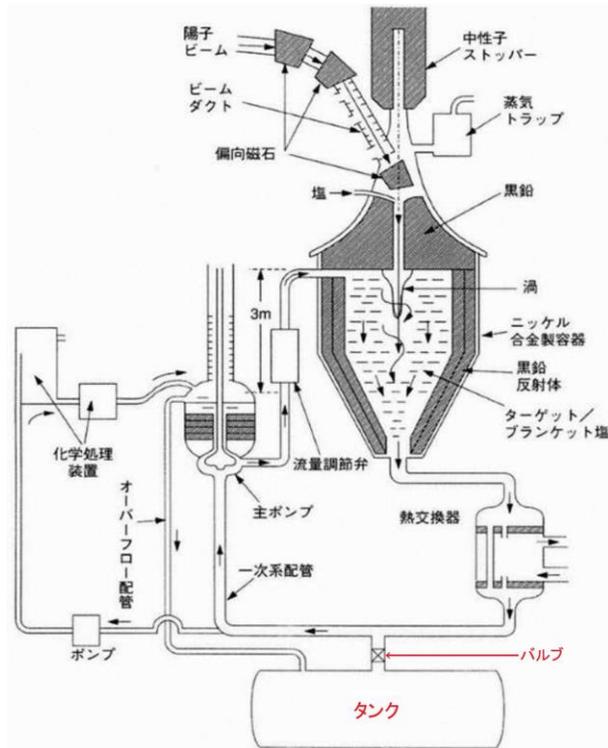


図1 加速器溶融塩増殖炉の概念図

2. Th 溶融塩炉の非常停止

図1はTh溶融塩炉の概念図である(古川和男「原発安全革命」2014文芸春秋)。Th溶融塩炉は連続運転炉である。1年以上もの核燃料を抱えてバッチ運転される現行軽水炉とは大きな違いである。運転中何らかの原因によって電源を喪失した場合、系内から非常用タンクに繋がっているパイプの冷却機能が失われ、凝縮して”栓”をしていた溶融塩が融解し、系内の溶融塩はタンク内に流入する。タンク内には冷却用の油が入っているものと思われる。冷却媒として水を使いたいところだが、溶融塩が直接水と接触すれば水蒸気爆発を起こす危険性があるので使われまいだろう。タンクは水冷が望ましいが電源喪失が前提なので空冷で設計されるべきである。

熱中性子が存在する反応室内はもちろん系内の溶融塩は全て速やかにタンク内に移さなければならない。そのためにはタンクへの流入パイプの口径と溶融塩の粘度が適正でなければならない。つまり溶融塩の融点は400℃台だが、操炉温度は800℃程度要求される可能性がある。したがってタンクに流入した溶融塩は途切れることなく一体となっているものと考えられる。タンク内に流入した溶融塩中には核廃棄

物と未反応の核原料が含まれている。核廃棄物からは残存している放射性元素が崩壊し、崩壊熱を発生する。

3. タンク内溶融塩の熱的挙動

このレポートで使われる記号の意味は下表のとおりである。

表1 記号の意味

$\theta(t)$: タンク内溶融塩の温度	V : タンク内容積
$\theta_0 = \theta(0)$: 初期温度	S : タンク表面積
θ_A : タンク外周辺温度	L : 薄板 (正方形) の辺の長さ
h : 溶融塩→タンク周辺への総括伝熱係数	l : 薄板状タンクの厚み
q : 崩壊熱	c, ρ : 溶融塩の比熱、密度
τ : 時定数	R : 球状タンクの半径

タンク内に存在する溶融塩の熱的挙動を図2により考察してみよう。溶融塩の体積≡タンク内の容積とし、タンク内の温度分布を無視すれば、次のような熱収支の常微分方程式(1)とその解(3)が得られる：

$$c\rho V \frac{d\theta}{dt} = -h(\theta - \theta_A)S + qV \Rightarrow \tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_A + \frac{qV}{hS} \cdots (1) ; \tau = \frac{c\rho V}{hS} \cdots (2).$$

$$\theta(t) = \theta_A + \frac{qV}{hS} + \left((\theta_0 - \theta_A) - \frac{qV}{hS} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cdots (3) ; \theta(\infty) = \theta_A + \frac{qV}{hS} \cdots (4).$$

図3Aに温度変化のイメージを図示した。タンク内に流れ込んだ溶融塩は冷却媒により若干温度が下っても、まだ溶融状態と考えられる。 $\theta_0 - \theta_A < qV/(hS)$ ならば、温度は単調増加なので、溶融状態を続ける。逆ならば、単調減少なので外側は凝縮してガラス状態になる場合もあるだろう。

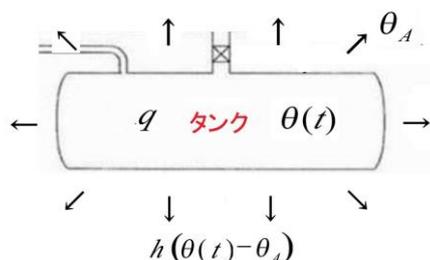


図2 タンクからの放熱

重要なパラメーターは時定数 τ と平衡温度 $\theta(\infty)$ である。両者ともに形状による影響を受ける。両極端である球状と薄板状の場合について表2にまとめた。時定数も平衡温度も、原理的には、薄板状にすることで値を小さくすることが可能である。しかし、現実的にはブロッキーなものにならざるを得まい。タンクに平衡温度に耐えられる耐火度さえあれば、単調増加の場合も、フェイルセーフが可能である。

表2 タンク内溶融塩温度に対するタンクの形状の影響

	V	S	τ	$\theta(\infty)$
球	$\frac{4}{3}\pi R^3$	$4\pi R^2$	$\frac{c\rho R}{3h}$	$\theta_A + \frac{qR}{3h}$
薄板	$L^2 l$	$\approx 2L^2$	$\frac{c\rho l}{2h}$	$\theta_A + \frac{ql}{2h}$

$t/\tau \ll 1$ ならば、 $\theta(t) \doteq \theta_0 + \left(\frac{qV}{hS} - (\theta_0 - \theta_A) \right) \frac{t}{\tau} \dots (5)$ 、となる。

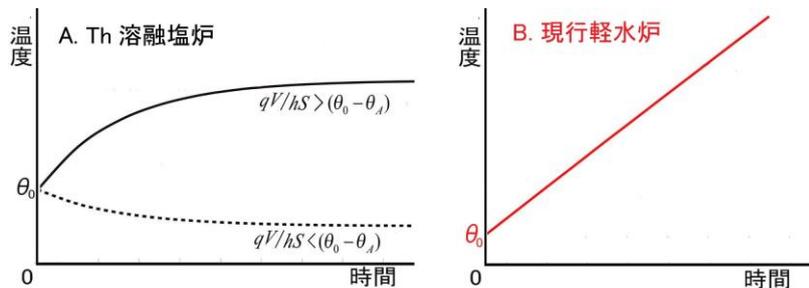


図3 溶融塩炉および現行軽水炉残渣温度の経時変化

4. 現行軽水炉への展開

現行軽水炉は非常停止をした後、熱中性子の供給が止まり核分裂反応は停止するが、1年以上もの長期間運転されるバッチ炉なので、運転末期の炉内には、連続運転される炉とは比較にならない程、大量の放射性廃棄物が存在している。核燃料の放射能の半減期 (U^{235} : 7 億年、 U^{238} : 45 億年、 Th^{232} : 141 億年) は長いので発熱量は無視できるが、放射性廃棄物から発生する崩壊熱は大きい。一方、電源が失われているので、冷却能力 h は落ちている。形状もブロッキーで時定数は大きく、崩壊熱は Th 溶融塩炉に対して比較にならない程大きい。平衡温度が高いため、非常停止の後、可及的速やかに冷却能力を回復させなければならない。高温のまま放置すれば金属が水と反応し水素が発生がし爆発する危険性がある。電源喪失の場合、軽水炉はフェイルセーフが困難なプラントといわざるを得ない。

5. あとがき

以上、連続運転プロセスの Th 溶融塩炉のフェイルセーフ性についてモデル的考察を試みたが、実際の運転で想定されるデータが欠如しているので迫力に欠ける解析となった。しかし、フェイルセーフ性に関する Th 溶融塩炉と現行軽水炉の差は明らかである。これに対する現行軽水炉の改良案の一つが小型化である。だが、放射性廃棄物の滞在量を連続運転炉並みに小さくできるほどの小型化は現実的でない。

加うるに、Th 溶融塩炉は、超ウラン元素を生成しないため、加速器により、廃棄物中の放射性元素の半減期を 300 年程度まで短縮できるといわれている。核弾頭への転用が困難であることも大きな利点である。トリウム資源はウラン程偏在していない。よくいわれるフッ化物溶融塩に耐える材料がないという批判は酸化被膜を除去したハステロイによる長期運転の実績がある。しかし、核保有国は、核弾頭の更新のため、現行軽水炉を止める訳にはいかないのである。

唯一の被爆国にして非核三原則を提唱する日本こそ、率先して、Th 溶融塩炉を実用化すべきである。

以上