

TRIGA 炉の大きな負の反応度温度係数¹

千葉 豪

TRIGA 炉は極めて大きな負の反応度温度係数を持つことから、炉に正の反応度を与えても出力が暴走してメルトダウンが発生することはほぼありえないとされている。本稿では、TRIGA 炉が大きな負の反応度温度係数を持つ物理的な機構について整理する。

Wikipedia によると、TRIGA は「Training, Research, Isotopes, General Atomics」の略語であり、General Atomics 社が開発した原子炉を指す。スイミングプール型原子炉で、20%の濃縮ウランと水素化ジルコニウムの合金 (UZrH) からなる固体均質燃料を用いる。世界では 70 基程度が設置されており、日本では立教大、武蔵工業大などに設置された。

本検討に用いる TRIGA 炉の基礎データとしては、ICSBEP ハンドブックに収納されている IEU-COMP-THERM-003 のデータを用いた。これはスロベニアに設置されている TRIGA MARK-II の臨界データである。燃料棒は、半径 0.3175 cm の中空部に Zr が挿入されている半径 1.82245 cm の燃料合金を、厚さ 0.05461 cm のステンレス鋼が覆う構造となっている（従って、燃料棒の半径は 1.87706 cm）。炉心内では燃料棒は六角配列で並べられ、隣接燃料棒間の距離は 4.054 cm である。単位燃料セルを構成する媒質の数密度を Table 1 に示す。

Table 1: Atomic number densities of media

Material	Component	Atom density [atoms/barn/cm]
Fuel mixture U-ZrH	H	5.5253e-2
	Zr	3.4530e-2
	U-238	1.4625e-3
	U-235	3.6801e-4
Zr rod	Zr	4.2843e-2
Element cladding	Fe	5.6860e-2
	Cr	1.7360e-2
	Ni	8.0948e-3
	Mn	1.7295e-3
	Si	3.3831e-3
	C	3.1643e-4
	P	6.1353e-5
	S	5.9256e-5
Water (T=23°C)	H	6.6689e-2
	O	3.3344e-2

TRIGA 炉と一般的な軽水炉を比較した場合、以下が差異として挙げられるであろう。

- TRIGA 炉では燃料合金における燃料核種の数密度が小さいので、燃料核種に対する背景断面積が大きくなり、共鳴自己遮蔽効果が小さくなると考えられる。
- TRIGA 炉では燃料自体に水素原子が含まれる。従って、燃料温度の変化に伴う熱中性子散乱の変化の影響が大きいと考えられる。

前者については、共鳴自己遮蔽効果が小さくなるとドップラー効果も小さくなると考えられる。一方、実効断面積の絶対値は大きくなるため、温度変動に伴う実効断面積の絶対変動量も大きくなり、ドップラー反応

¹ /Document/Fundamental/TRIGA

度も大きくなるとも考えられる（どこかに極大点があるかもしれない）。後者については、燃料温度の増加に伴い熱中性子散乱が活発になると、中性子束のエネルギースペクトルが硬化するため、負の反応度が入ることが予想される。

以上の定性的な考察に対して、CBZ コードシステムを用いて定量的な評価を行った。

単位燃料セルとして、燃料合金中心の Zr 棒を無視した一次元円筒体系を考えた。減速材領域の外径は 2.3 cm 程度とした（六角配列の体積を保存する場合は 2.23 cm 程度となる）。全ての媒質の温度を 300 K とした基準体系と、燃料合金の温度を 1300 K とした摂動体系の反応度差（ドップラー反応度）を摂動計算により求めた。中性子の輸送計算は 361 群の衝突確率法を用い、熱中性子散乱を考慮する上限エネルギーは 10 eV とした。また、核データは JENDL-4.0 を用いた。

以上の計算を、以下の 4 ケースについて行った。

- ケース 1：燃料合金の水素の熱中性子散乱データとして、ZrH のものを使用。
- ケース 2：燃料合金の水素の熱中性子散乱データとして、水分子のものを使用。
- ケース 3：燃料合金の水素の熱中性子散乱データとして、自由気体モデルのものを使用。
- ケース 4：燃料合金の水素に対して熱中性子散乱データを使用しない。
- ケース 5：燃料合金の水素を考慮しない。

計算結果を Table 2 に示す。

Table 2: k_{∞} at the reference state and Doppler reactivity

Case	k_{∞}	Doppler reactivity (dk/kk')		
		Total	Absorption	Scattering
1	1.47750	-0.0396	-0.0098	-0.0278
2	1.48892	-0.0395	-0.0099	-0.0278
3	1.50510	-0.0452	-0.0097	-0.0334
4	1.56416	-0.0059	-0.0092	+0.0041
5	1.53736	-0.0106	-0.0100	+0.0002

以上の計算結果より、以下のことが分かった。

- 反応度の吸収成分における計算ケース間の差異が小さいことから、TRIGA 炉の燃料において共鳴自己遮蔽効果が小さくなることは、大きい負の温度係数に寄与するものではないと考えられる。
- 一方、反応度の散乱成分は、水素の熱中性子散乱を考慮することによって大きな負の値を示した。TRIGA 炉の燃料に水素が含まれることが、大きい負の温度係数に寄与すると考えてよいであろう。
- 燃料中の水素の熱中性子散乱モデルの差異がドップラー反応度に及ぼす影響は小さい。従って、TRIGA 炉の大きい負の温度係数は、「ZrH ゆえ」というわけではなく、あくまで燃料中に水素を含むことに起因すると考えてよいであろう。

燃料領域における中性子束のエネルギースペクトルを Fig. 1 に示す。

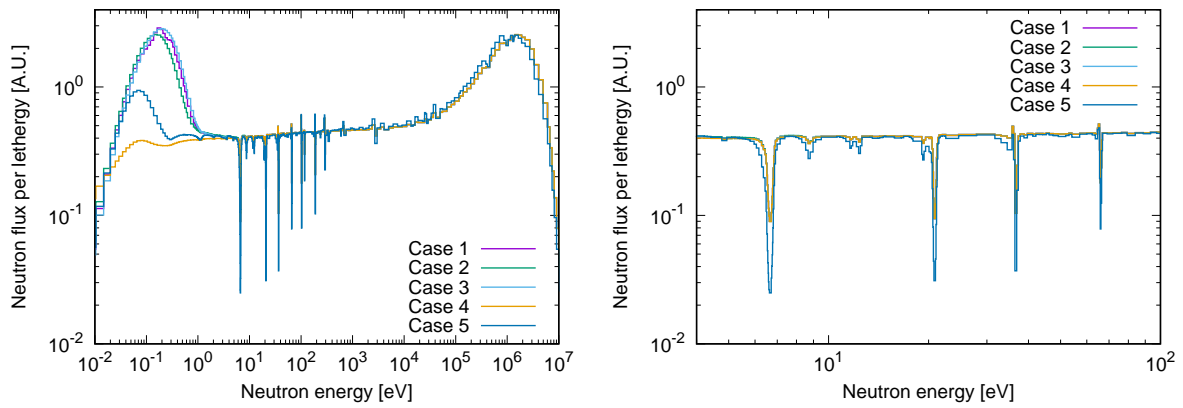


Fig. 1: Neutron flux energy spectra in fuel region

- ケース 5 では燃料合金中の水素を無視するため、U-238 の共鳴による中性子束エネルギースペクトルのより大きな歪みが観察される。
- 燃料合金中の水素の熱中性子散乱を無視したケース 4 では熱中性子領域における中性子束のピークが他と比べて低い。燃料合金中の水素が熱中性子に対しては吸収材としてのみ機能していることが理由と考えられる²。

²Table 2 に示されているように、 k_{∞} はケース 4 が最大を示している。燃料合金中の水素は、中性子減速材としての役割に加えて、熱中性子束ピークを形成する役割、熱中性子吸収材としての役割を果たしていると考えられ、それらの正味の効果としてこのような結果が得られたものと現時点では解釈する。

A 検証計算結果

本検討を実施するにあたって、ZrH 中の H の多群熱中性子散乱データを FRENDY で作成した。以下では、MVP-3 を参照解とした検証計算結果を述べる。

はじめに、本検討で扱った問題に対して、熱中性子散乱の上限エネルギー E_{up} を変えた計算を行った。結果を Table 3 に示す。なお、MVP-3 の計算結果の統計誤差は 1σ で 0.01% 程度である。また、ZrH 中の H の多群熱中性子散乱データとして NJOY-2016 で処理したものをを用いた場合の結果も併せて示す。この結果より、FRENDY で処理した熱中性子散乱データを用いた場合に、CBZ の計算結果は参照解を良好に再現していることが分かる。また、NJOY-2016 で処理したデータを用いた場合には、顕著な計算結果の E_{up} の設定値に対する依存性が観察される。この原因は明らかではないが、NJOY-2016 の使用方法（入力条件の設定）に何らかの問題がある可能性もある。

Table 3: k_{∞} with different E_{up}

E_{up} [eV]	MVP	CBZ	CBZ (with NJOY-2016)
1	1.4751	1.47787	1.47908
2		1.47782	1.47623
4		1.47777	1.47361
10	1.4748	1.47749	1.46364
20		1.47742	
100	1.4749	1.47744	

次に、 E_{up} を 10 eV とした条件で、燃料領域の温度を変えた計算を行った。結果を Table 4 に示す。CBZ の結果は参照解を概ね良好に再現するものの、両者の差異において僅かな燃料温度依存性が観察される³。

Table 4: k_{∞} with different fuel temperature

Fuel temperature [K]	MVP	CBZ
400	1.4666	1.46905
600	1.4452	1.44816
800	1.4239	1.42745
1000	1.4053	1.40916
1200	1.3888	1.39316

本検討では、燃料領域の Zr 同位体に対して ZrH 中の Zr の熱中性子散乱データは用いなかった。その影響を見るために、MVP-3 の計算でそれらのデータを用いた計算を行ったが、 E_{up} が 10 eV、燃料温度 400、1200 K の条件で、有意な差異は見られなかった。

³CBZ の計算では燃料領域中の Zr の熱中性子散乱の影響を考慮していないことが可能性として挙げられる（MVP の計算では自由気体モデルで考慮）。