

2022年2月16日
京大 KUCA ヒアリング資料

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

【燃料誤装荷の解析について】

京都大学複合原子力科学研究所

燃料誤装荷の解析について

固体減速炉心において燃料を誤って 1 体追加で作成してしまい、それを炉心に装荷した場合の解析について説明する。

固体減速炉心の代表炉心を図 1-1～1-2 に示す。

各炉心で燃料 1 体を誤装荷した際の反応度を表 1 に示す（解析は SRAC-CITATION）。

これまでの代表炉心について解析結果を整理する。

- ① 燃料誤装荷前の反応度(0.35% $\Delta k/k$)
- ②燃料誤装荷時の燃料装荷反応度(まとめ資料 P.290 表 3-1-2 等)
- ③添八で求めた制御棒の反応度(まとめ資料 P.98 表 4 等)に解析誤差を乗じた反応度
- ④添八で求めた中心架台の反応度(まとめ資料 P.101 表 5 等)に解析誤差を乗じた反応度

結果を表 2-1 に示す。添八で求めた中心架台の反応度(まとめ資料 P.101 表 5 等)は L3P の炉心以外は中心架台の反応度が小さくなる高さ 30cm の炉心での値を示しており、すべて燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても未臨界である。

表 2-1 の中心架台の解析についてすべてモンテカルロ計算コード MCNP を用いて行ったときの同様の結果を表 2-2 に示す。これらすべて代表炉心について燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても未臨界である。

これらの結果に加えて、燃料誤装荷時の反応度印加量が大きい L2-50 炉心と L3-50 炉心について、MCNP での反応度の解析を行った。

結果を表 3 に示す。両炉心とも最大反応度の燃料集合体 1 体を誤装荷したとしても未臨界である。

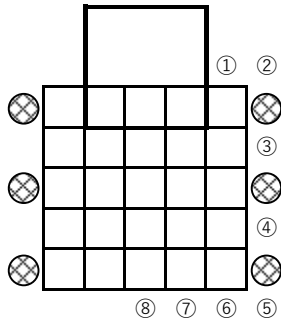
この誤装荷の解析は燃料体を 1 体余分に作成してしまつて追加で装荷することを想定しているが、規定の燃料体数の範囲で燃料を別の場所に挿入してしまうこと、すなわちレイアウト間違いをしてしまうことについて検討する。

反応度の影響が小さい場所から大きい場所に誤装荷することについては、余分に作成してしまつた 1 体を反応度が大きな場所に追加挿入してしまう場合に包含されると考えられる。

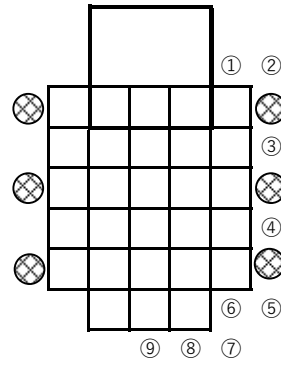
低濃縮ウランの固体減速炉心では、過剰反応度調整用に燃料セルの繰り返し数が少ない燃料集合体（反応度調整用燃料体）を用いる場合がある。これは、通常の臨界近接の手順

に従い、炉心を臨界に至らしめた後、炉心最外周に設置することで実験目的に応じて過剰反応度を調整するために使用するものである。従って、炉心最外周に設置すべき反応度調整用燃料体のレイアウト間違いが発生した場合、インポートランスの高い場所に反応度調整用燃料体を置くこととなるため、炉心の過剰反応度は小さくなり安全側となる。

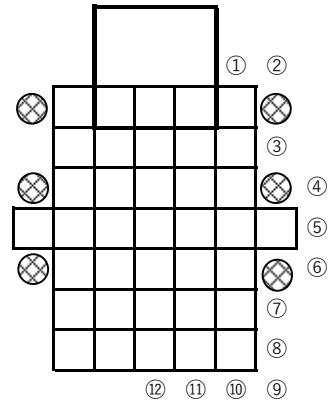
L5.5(50cm)



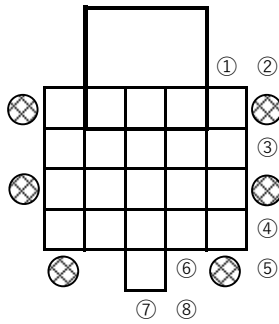
L5.5(40cm)



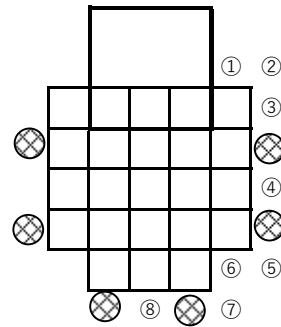
L5.5(30cm)



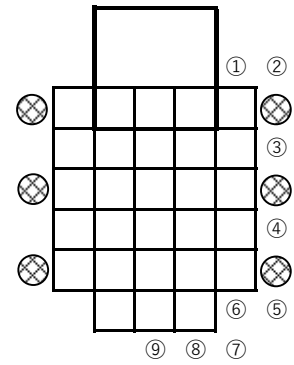
L4(50cm)



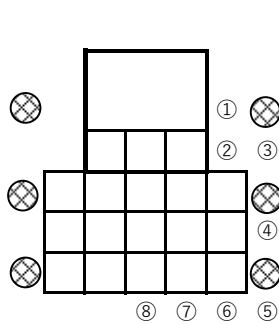
L4(40cm)



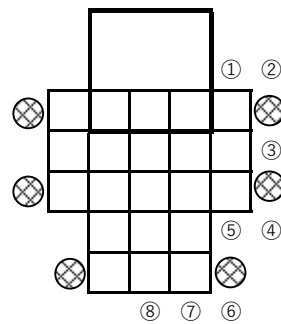
L4(30cm)



L3(50cm)



L3(40cm)



L3(30cm)

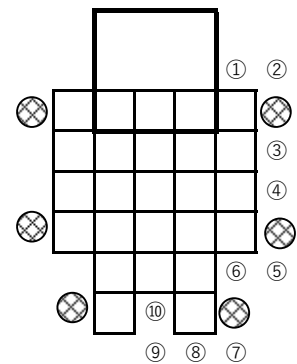
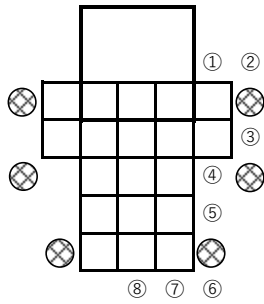
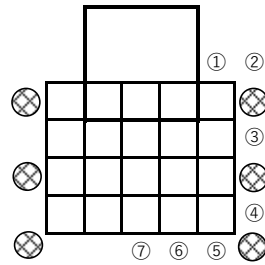


図 1-1 各炉心の燃料装荷位置 (L5.5、L4、L3 炉心)
炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

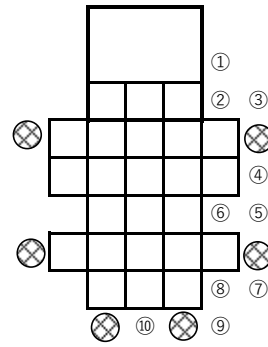
L2(50cm)



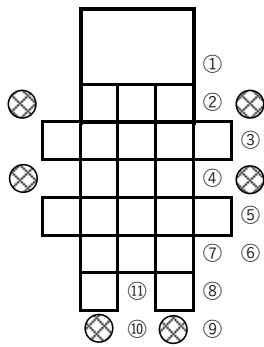
L2(40cm)



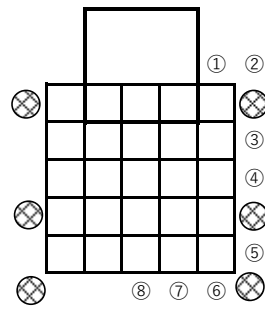
L2(30cm)



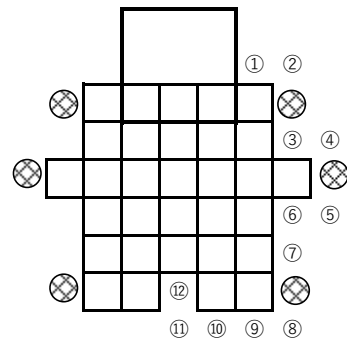
L1(50cm)



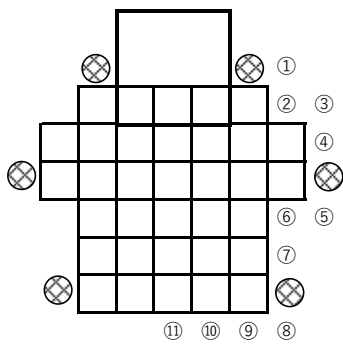
L1(40cm)



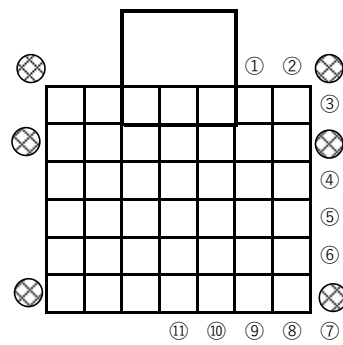
L1(30cm)



LL1(50cm)



LL1(40cm)



LL1(30cm)

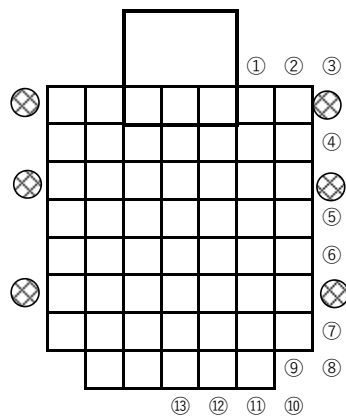


図 1-2 各炉心の燃料装荷位置 (L2、L1、LL1 炉心)

炉心配置図の上のほうの 3×3 の黒い枠線が中心架台位置

表 1 燃料 1 体を追加したときの反応度 (% Δ k/k)

位置	炉心																	
	L5.5-50	L5.5-40	L5.5-30	L4-50	L4-40	L4-30	L3-50	L3-40	L3-30	L2-50	L2-40	L2-30	L1-50	L1-40	L1-30	LL1-50	LL1-40	LL1-30
①	0.422	0.326	0.181	0.632	0.522	0.320	0.715	0.634	0.448	0.774	0.791	0.482	0.785	0.644	0.452	0.566	0.526	0.298
②	0.197	0.150	0.086	0.297	0.237	<u>0.152</u>	1.200	0.305	0.215	0.383	0.418	0.717	0.714	0.395	0.300	0.400	0.347	0.197
③	0.663	0.548	0.376	0.805	0.496	0.522	0.655	0.749	0.681	0.884	0.890	0.456	0.997	0.909	0.442	0.610	0.287	0.143
④	0.663	0.708	0.218	0.649	0.777	0.627	0.884	0.775	0.798	1.854	0.650	0.787	0.901	1.029	0.442	0.450	0.543	0.254
⑤	0.197	0.505	0.231	0.388	0.426	0.289	0.399	1.288	0.498	1.683	0.749	0.998	1.096	0.559	0.559	0.974	0.661	0.459
⑥	0.422	0.262	0.214	1.137	0.796	0.571	0.826	0.403	0.801	0.481	1.322	1.257	1.053	0.620	0.685	0.739	0.446	0.456
⑦	0.760	0.243	0.433	0.526	0.401	0.266	1.446	0.612	<u>0.179</u>	0.717	1.599	0.376	1.014	0.974	0.711	0.954	0.216	0.262
⑧	0.927	0.401	0.226		0.641	0.420	1.745	0.747	0.266	0.868		0.557	0.924	1.063	<u>0.219</u>	0.380	0.339	0.306
⑨		0.488	<u>0.076</u>			0.513			0.415			<u>0.370</u>	0.438		0.326	0.531	0.531	<u>0.180</u>
⑩			0.194						0.757			0.518	0.847		0.555	0.718	0.737	0.296
⑪													0.562		0.994	0.834	0.813	0.283
⑫															0.664			0.377
⑬																		0.422

太字は同じ燃料セルの炉心での最大値

下線付き太字は同じ燃料セルの炉心での最小値

各炉心の燃料装荷位置は図 1-1、図 1-2 に示す

表 2-1 燃料誤装荷後の反応度 (中心架台反応度は「添付 8 まとめ資料の p101 表 5」による)

	A	B	C = B * (100% - 18%)	D	E = D * (100% - 18%)	F = A - (C/2) - E	G	H = F + G	
炉心	誤装荷前炉心の過剰反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	中心架台反応度* [%dk/k]	中心架台反応度* (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	炉心配置変更作業開始時の反応度 [%dk/k]	誤装荷による添加反応度の最大値 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きた場合の反応度 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きても未臨界状態が維持されるか?
L5.5P-50	0.35	1.67	1.37	1.33	1.09	-1.43	0.927	-0.50	Yes
L5.5P-40	0.35	2.00	1.64	1.33	1.09	-1.56	0.708	-0.85	Yes
L5.5P-30	0.35	1.68	1.38	1.33	1.09	-1.43	0.433	-1.00	Yes
L4P-50	0.35	2.47	2.03	2.27	1.86	-2.53	1.137	-1.39	Yes
L4P-40	0.35	2.28	1.87	2.27	1.86	-2.45	0.796	-1.65	Yes
L4P-30	0.35	1.94	1.59	2.27	1.86	-2.31	0.627	-1.68	Yes
L3P-50	0.35	1.83	1.50	4.55	3.73	-4.13	1.745	-2.38	Yes
L3P-40	0.35	2.52	2.07	2.94	2.41	-3.10	1.288	-1.81	Yes
L3P-30	0.35	1.65	1.35	2.94	2.41	-2.74	0.801	-1.94	Yes
L2P-50	0.35	2.36	1.94	2.33	1.91	-2.53	1.854	-0.68	Yes
L2P-40	0.35	1.75	1.44	2.33	1.91	-2.28	1.599	-0.68	Yes
L2P-30	0.35	2.03	1.66	2.33	1.91	-2.39	1.257	-1.13	Yes
L1P-50	0.35	2.04	1.67	1.84	1.51	-2.00	1.096	-0.90	Yes
L1P-40	0.35	1.96	1.61	1.84	1.51	-1.97	1.063	-0.91	Yes
L1P-30	0.35	2.00	1.64	1.84	1.51	-1.98	0.994	-0.99	Yes
LL1P-50	0.35	4.01	3.29	1.84	1.51	-2.81	0.974	-1.84	Yes
LL1P-40	0.35	1.96	1.61	1.84	1.51	-1.97	0.813	-1.16	Yes
LL1P-30	0.35	2.10	1.72	1.84	1.51	-2.02	0.459	-1.56	Yes
データの出典	まとめ資料 p98 表4	まとめ資料 p98 表4		まとめ資料 p101 表5			まとめ資料 p288 表3-1-1		

* 燃料集合体の一部+反射体の一部から成る中心架台 (実際の中心架台の形状とは一致しない) (青字の数字は高さ 30cm の炉心の値を記載)
制御棒反応度、中心架台反応度の解析精度は 18%とする

表 2-2 燃料誤装荷後の反応度 (中心架台反応度は MCNP の解析結果による)

	A	B	C = B * (100% - 18%)	D	E = D * (100% - 18%)	F = A - (C/2) - E	G	H = F + G	
炉心	誤装荷前炉心の過剰反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 [%dk/k]	全制御棒反応度 (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	中心架台反応度* [%dk/k] MCNP計算	中心架台反応度* (解析誤差を考慮した値) [%dk/k]	炉心配置変更作業開始時の反応度 [%dk/k]	誤装荷による添加反応度の最大値 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きた場合の反応度 [%dk/k]	炉心配置変更作業中に誤装荷が起きても未臨界状態が維持されるか?
L5.5P-50	0.35	1.67	1.37	8.22	6.74	-7.08	0.927	-6.15	Yes
L5.5P-40	0.35	2.00	1.64	6.47	5.31	-5.78	0.708	-5.07	Yes
L5.5P-30	0.35	1.68	1.38	3.47	2.85	-3.19	0.433	-2.76	Yes
L4P-50	0.35	2.47	2.03	11.5	9.43	-10.10	1.137	-8.96	Yes
L4P-40	0.35	2.28	1.87	9.72	7.97	-8.56	0.796	-7.76	Yes
L4P-30	0.35	1.94	1.59	5.93	4.86	-5.31	0.627	-4.68	Yes
L3P-50	0.35	1.83	1.50	12.7	10.41	-10.81	1.745	-9.06	Yes
L3P-40	0.35	2.52	2.07	11.9	9.76	-10.45	1.288	-9.16	Yes
L3P-30	0.35	1.65	1.35	8.64	7.08	-7.41	0.801	-6.61	Yes
L2P-50	0.35	2.36	1.94	17.5	14.35	-14.97	1.854	-13.12	Yes
L2P-40	0.35	1.75	1.44	7.96	6.53	-6.90	1.599	-5.30	Yes
L2P-30	0.35	2.03	1.66	9	7.38	-7.86	1.257	-6.60	Yes
L1P-50	0.35	2.04	1.67	10.7	8.77	-9.26	1.096	-8.16	Yes
L1P-40	0.35	1.96	1.61	8.87	7.27	-7.73	1.063	-6.67	Yes
L1P-30	0.35	2.00	1.64	8.7	7.13	-7.60	0.994	-6.61	Yes
LL1P-50	0.35	4.01	3.29	5.83	4.78	-6.08	0.974	-5.11	Yes
LL1P-40	0.35	1.96	1.61	3.93	3.22	-3.68	0.813	-2.87	Yes
LL1P-30	0.35	2.10	1.72	3.23	2.65	-3.16	0.459	-2.70	Yes
データの出典	まとめ資料 p98 表4	まとめ資料 p98 表4		まとめ資料(添付10) p92 表3-1-2と追加計算			まとめ資料 p288 表3-1-1		

*中心架台反応度の MCNP 計算結果の標準偏差は値の 1%以下

表 3 燃料誤装荷の反応度 (MCNP の解析結果による)

状態 ¹⁾	L2-50 炉心	L3-50 炉心
中心架台 LL 制御棒 3 本 LL、3 本 UL (起動前の状態) [1]	keff : 0.84603 ± 0.00020 ([3]との反応度差 17.5 ± 0.03%dk/k)	keff : 0.88401 ± 0.00020 ([3]との反応度差 12.7 ± 0.03%dk/k)
[1]の状態 燃料 1 体追加で誤装荷 [2]	keff : 0.86241 ± 0.00018 ([3]との反応度差 15.2 ± 0.03%dk/k) 図 1-2 の L2-50 炉心の④に誤装荷	keff : 0.91366 ± 0.00019 ([3]との反応度差 8.98 ± 0.03%dk/k) 図 1-1 の L3-50 炉心の⑧に誤装荷
中心架台 UL 制御棒 3 本 LL、3 本 UL (起動中の状態) [3]	keff : 0.99261 ± 0.00017	keff : 0.99533 ± 0.00020
中心架台 UL 制御棒 3 本 UL、3 本 UL (最大過剰反応度印加状態) [4]	keff : 1.00562 ± 0.00013 ²⁾	keff : 1.00534 ± 0.00017 ²⁾

1) LL: Lower Limit (下限)、UL: Lower Limit (下限)

2) SRAC-CITATION では[4]の実効増倍率は 1.00351 (ρ : 0.35% $\Delta k/k$)

補足 A

中心架台が上限と下限の場合の制御棒反応度について

燃料誤装荷時の反応度印加量が大きな L2-50 炉心と L3-50 炉心について、中心架台が上限の場合と下限の場合の制御棒反応度を MCNP により解析した。(炉心配置は図 1-1、図 1-2 に示す通り)

6 本の制御棒の反応度合計の解析結果を表 A-1 に示す。どちらの炉心も中心架台下限の状態のほうが制御棒反応度は大きくなっており、中心架台下限の起動前の未臨界度は、通常運転状態の制御棒反応度を用いて評価した値より大きいことが判る。

なお、添付八に示した制御棒反応度の解析結果は SRAC-CITATION を用いた結果であり、MCNP の結果と比べると誤差として考えた 18%の範囲内に入っている。

表 A-1 制御棒反応度 (中心架台が下限と上限の状態)

炉心		中心架台上限 (運転中の状態)	中心架台下限 (起動前の状態)
L2-50 炉心	全制御棒 IN keff	0.98096±0.00019	0.87100±0.00020
	全制御棒 OUT keff	1.00558±0.00020	0.89994±0.00019
	制御棒反応度 (% Δ k/k) ²⁾	2.50±0.03	3.69±0.03
	参考値 (% Δ k/k) ¹⁾	2.36	—
L3-50 炉心	全制御棒 IN keff	0.98652±0.00017	0.87461±0.00020
	全制御棒 OUT keff	1.00534±0.00017	0.89560±0.00018
	制御棒反応度 (% Δ k/k) ²⁾	1.90±0.03	2.68±0.03
	参考値 (% Δ k/k) ¹⁾	1.83	—

1) 参考値は添付八に記載した SRAC-CITATION で求めた制御棒反応度

2) 制御棒反応度は $1/\text{keff}(\text{制御棒 IN}) - 1/\text{keff}(\text{制御棒 OUT})$

補足 B

中心架台の設定位置の違いによる反応度

燃料誤装荷時の反応度印加量が大きな L2-50 炉心と L3-50 炉心について、中心架台の位置が異なる場合の反応度について MCNP により解析した。(炉心は図 1-1、図 1-2 の通り)

中心架台には燃料体を最低でも 1 体以上載せることを設置変更申請書の本文に記載しているので、図 B-1 に示した通り、反応度が小さいと考えられる体系の隅にある燃料体 1 体を 3×3 の中心架台に載せたときを考える。隅の燃料体を中心架台に含めるためにはその近くの制御棒が邪魔になってしまうが、ここでは反応度への影響を調べるために仮にこのような配置が可能となったものとして考える。

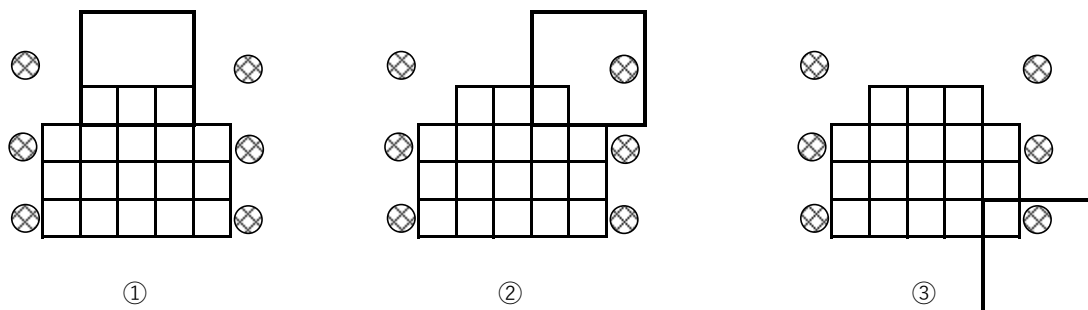
中心架台の反応度を表 B-1 に示す。中心架台の位置を変更したとしても中心架台の反応度は十分に大きな値であり、表 2-2 の解析に用いたとしても最右欄の計算結果は”yes”となり燃料誤装荷した場合であっても未臨界状態を保つことができる。

表 B-1 中心架台の反応度

炉心	中心架台位置		
	図 B-1 ① (% Δ k/k)	図 B-1 ② (% Δ k/k)	図 B-1 ③ (% Δ k/k)
L2-50 炉心	17.5	4.69	4.98
L3-50 炉心	12.7	5.75	3.42

* MCNP 計算結果の標準偏差は値の 1%以下

L3(50cm)



L2(50cm)

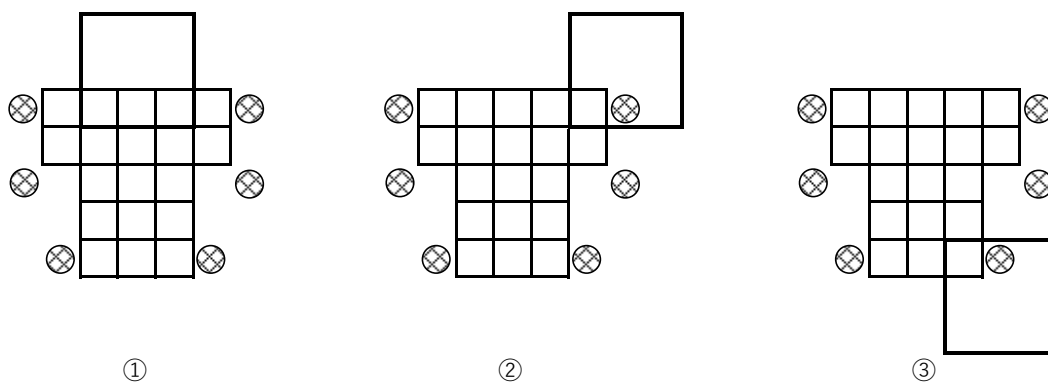


図 B-1 L3-50 炉心と L2-50 炉心の中心架台の位置
(太い線が 3×3 の中心架台の位置。①は図 1-1、1-2 と同じ)

補足 C

保安規定での中心架台の反応度に関する記載の追加

原子炉施設保安規定の別表第 2 の 2（「臨界装置に関する炉心配置その他の制限」）に以下のような記載を追加する。

「正の過剰反応度を持つ固体減速炉心で、全ての制御棒のうち半数が上限、残り半数が下限、中心架台が下限の状態において、その炉心を構成する燃料集合体のうち任意の 1 体を炉心の任意の位置に追加で装荷した場合であっても未臨界状態となること。」