

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 14日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360398

研究課題名（和文） 高速・熱中性子結合炉心の炉物理的研究

研究課題名（英文） Reactor Physics study of fast and thermal neutron coupled cores

研究代表者

岡 芳明（OKA YOSHIAKI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：40011225

研究成果の概要（和文）：高速・熱中性子結合炉心は高速炉心に熱中性子を発生する領域が分散配置された高速炉心である。高速・熱中性子結合炉心の核的な特性を原子炉物理学の観点から明らかにするとともに水冷却高速炉の高増殖性について研究した。

まず、高速・熱中性子結合炉心は炉心の非均質性が高いため、隣接する集合体間の核的非均質性の影響をセル均質化マクロ断面積に反映させた炉心解析法を開発した。

次に、燃料棒を密に束ねた新燃料集合体を考案し、軽水冷却高速炉で、複合システム増倍時間が40年程度にできることを核的に世界で初めて明らかにした。熱水力設計を含む炉の成立性は今後の課題である。

研究成果の概要（英文）：Fast and thermal neutron coupled core is the fast reactor core with distributed regions generating thermal neutrons.

The nuclear characteristics has been clarified by changing core layout. The method of cell-homogenized macroscopic cross section preparation has been developed by taking the surrounding fuel assemblies into consideration.

A new fuel assembly of tightly coupled fuel rods was devised. High breeding characteristics is achieved for the first time in the world with light water cooling. Compound system doubling time of the fast reactor with the new fuel assemblies is less than 40 years. Thermal-hydraulic design remains for the future study.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	9,700,000	2,910,000	12,610,000

研究分野：原子力学

科研費の分科・細目：炉物理、核データ

キーワード：核設計、非均質炉、高速炉、水素化ジルコニウム、SRAC、結合炉、増殖、軽水

1. 研究開始当初の背景

(1) 熱中性子スペクトルの領域と高速中性子スペクトルの領域を1つの炉心に持つ原子炉は、概念そのものが新しく、その核特性について研究されたことがない。

(2) 研究代表者が考案し、第4世代原子炉として世界で研究開発されている超臨界圧水軽水冷却炉は、冷却水ボイド反応度低減のため水素化ジルコニウム層を持つブランケットを用いており、熱中性子が水素との散乱に

よって多数発生する高速・熱中性子結合炉心である。

(3) 従来の炉心解析法は高速炉あるいは熱中性子炉のいずれかを対象にしていたため、熱中性子領域が高速炉心に存在する高速熱中性子結合炉心を解析できない。

(4) 軽水冷却による高増殖性はこれまで研究開発機関や企業によって永年にわたり検討されたが達成されていない。高速・熱中性子結合炉心を用いて軽水冷却による高増殖達成の可能性がある。

2. 研究の目的

(1) 従来の炉心核設計計算法を高速・熱中性子結合炉心に適用する場合の精度と問題点を検証し、高速熱中性子結合炉心に適用できる核設計計算法を開発する。

(2) 軽水冷却による高増殖の核的可能性を高速・熱中性子結合炉心を用いて検討する。

3. 研究の方法

(1) 高速・熱中性子結合炉心を SRAC で核設計する場合の計算精度について MVP コードを参照解として検討し、その核的特徴を明らかにするとともに解析法を検討する。

(2) 周囲の燃料集合体の影響を考慮したセル均質化マクロ断面積の再構成手法を検討する。

(3) 燃料棒を密に束ねた燃料集合体を高速・熱中性子結合炉心に用いて 3 次元炉心燃焼計算法により、軽水冷却による高増殖性を核的に検討する。

4. 研究成果

(1)① 断面積作成： 図 1 の ZrH_{1.7} 付ブランケット集合体を SRAC の衝突確率計算で燃料棒と集合体体系で無限格子燃焼計算を行った。ZrH_{1.7} を含まないブランケットやシード集合体は燃料棒単位の計算で十分であるが、図 2 に見られるように、ZrH_{1.7} 付ブランケット集合体は集合体単位で断面積を作成し、ZrH_{1.7} は層体系ではなく棒状体系に近似して計算する必要があると分かった。

② 実効増倍率、ボイド反応度：ZrH_{1.7} 付ブランケット集合体数が図 3 と表 1 の様に異なる 4 種類の炉心について炉心計算を行った。燃焼初期の炉心の実効増倍率の比較を図 4 に、冷却水ボイド反応度の比較を図 5 に示す。SRAC 計算の実効増倍率は炉心内 ZrH_{1.7} の量に関わらず常に過小評価しており、ボイド反応度は ZrH_{1.7} 付ブランケットの少ない炉心では過大評価、ZrH_{1.7} 付ブランケットが多い

炉心では過小評価している事が分かった。

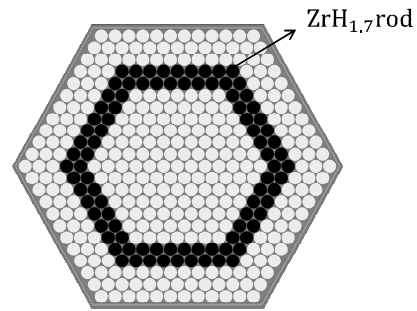


図 1. ZrH_{1.7} 付ブランケット集合体

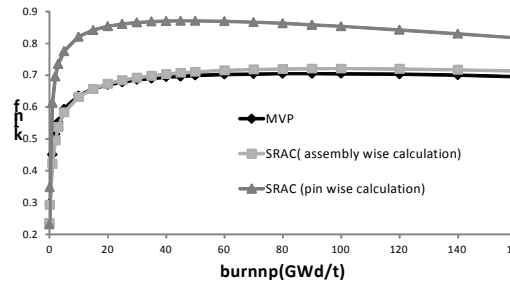


図 2. ZrH 付ブランケット集合体無限格子の燃焼計算

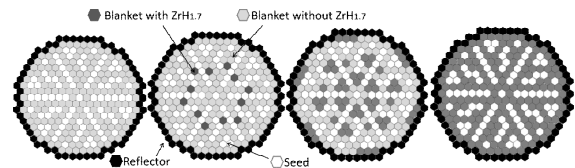


図 3. 炉心配置

(左から CORE1、CORE2、CORE3、CORE4)

表 1. 炉心と集合体数

	CORE1	CORE2	CORE3	CORE4
SEED	91	91	91	91
Blanket (without ZrH _{1.7})	162	12	60	0
Blanket (with ZrH _{1.7})	0	150	102	162

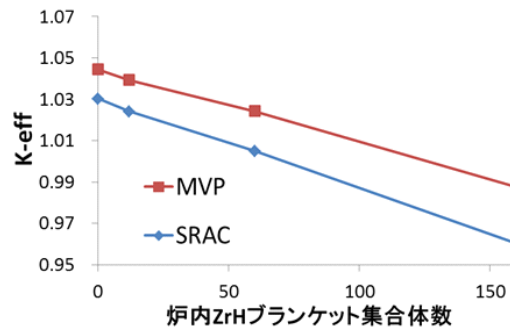


図 4. 4 炉心の実効増倍率

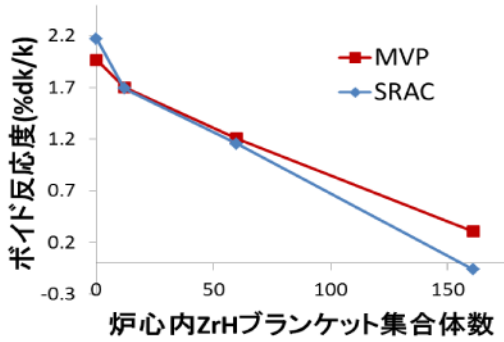


図 5. 4 炉心の炉心ポイド

(2) セル均質化マクロ断面積の再構成手法の開発

従来の手法では SRAC/COREBN が実効増倍率を過小評価する事が分かった。高速・熱中性子結合炉心は炉心の非均質性が高いため、集合体断面積を作成する際に周囲の集合体の影響を取り入れる必要がある。集合体無限セル計算と集合体無限セル計算で作成した断面積を用いた炉心解析結果を組み合わせ、隣接する集合体間の核的非均質性の影響をセル均質化マクロ断面積に反映させた炉心解析を検討した。方法を図 6 に示す。この手法は SRAC で作成する断面積は炉心の形状に関係なく、無限格子計算を一度行うだけで良いため、汎用性があり計算が容易である。その結果、表 2, 3 に見られる様に精度の良い断面積を再構成する事が出来た。

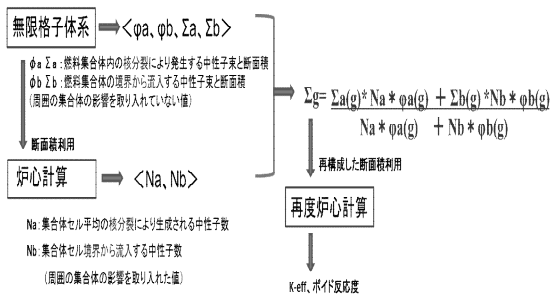


図 6. 断面積再構成の流れ

表 2. 核分裂断面積の再構

群	模擬炉心内のシード集合体	シード集合体セル計算 (old way)	差%	シード集合体再構成法 (new way)	差%
1	1.08E-02	1.04E-02	-3.70	1.09E-02	1.36
2	4.15E-03	4.01E-03	-3.37	4.06E-03	-2.22
3	4.38E-03	4.38E-03	0.00	4.38E-03	-0.14
4	1.04E-02	1.01E-02	-2.88	1.03E-02	-1.14
5	3.42E-02	3.26E-02	-4.68	3.30E-02	-3.71
6	6.00E-02	6.20E-02	3.33	5.81E-02	-3.23
7	6.39E-02	7.71E-02	20.66	6.76E-02	5.76
8	3.23E-02	3.59E-02	11.15	3.19E-02	-0.81
9	3.51E-02	3.46E-02	-1.42	2.97E-02	-15.40
10	1.83E-01	1.84E-01	0.55	1.65E-01	-9.88
11	3.86E-01	4.38E-01	13.47	3.75E-01	-2.88
12	3.45E-01	3.86E-01	11.88	3.39E-01	-1.66

表 3. 吸収断面積の再構成

群	模擬炉心内のシード集合体	シード集合体セル計算 (old way)	差%	シード集合体再構成法 (new way)	差%
1	1.24E-02	1.19E-02	-4.03	1.25E-02	1.28
2	6.63E-03	6.56E-03	-1.06	6.59E-03	-0.60
3	1.26E-02	1.27E-02	0.79	1.26E-02	0.30
4	3.40E-02	3.31E-02	-2.65	3.36E-02	-1.23
5	9.24E-02	9.01E-02	-2.49	8.99E-02	-2.67
6	1.53E-01	1.60E-01	4.58	1.49E-01	-2.18
7	1.51E-01	1.71E-01	13.25	1.55E-01	2.37
8	3.09E-01	2.95E-01	-4.53	2.89E-01	-6.48
9	6.58E-01	8.03E-01	22.04	6.58E-01	-0.01
10	4.87E-01	5.17E-01	6.16	4.63E-01	-4.91
11	7.22E-01	8.08E-01	11.91	7.01E-01	-2.92
12	6.81E-01	7.55E-01	10.87	6.77E-01	-0.53

(3) 新燃料集合体による水冷却高速炉の増殖性

新燃料集合体：水対燃料体積比を低減する方法として核融合炉ブランケットで考えられているような冷却水が管内を流れる“チューブインシェル”型の燃料集合体を用いる方法が考えられるが、多数のチューブのシェルへの溶接部が運転による熱サイクルによって破損し、燃料の密封性を失う可能性が高い。

燃料棒を密に束ねた燃料集合体を用いると通常の燃料棒のように上下の端栓部の溶接で燃料棒の密封性は保たれ、熱サイクルによって破損する可能性がない。この集合体では燃料棒径に依存せず水対燃料体積比は 0.085 と低減速 BWR (RBWR) の約 6 分の 1 に低減する。本研究で燃料棒径は 12mm で検討した。集合体ピッチは 247mm である。プルトニウムの同位体組成は軽水炉取り出しのもので、被覆管はステンレス鋼である。

核設計計算：3 次元 3 角格子体系で SRAC の ASMBURN COREBN を用いて核計算を行った。冷却水喪失時に負反応度となるようにブランケット燃料集合体には 2 層の水素化ジルコニウム棒を含むものを用いた。

まず低減速 BWR とスーパー高速炉の冷却水密度を (0.2489/cm³) で検討した。中性子束の大きい領域に多くのブランケット集合体を配置することが増殖において有効であり、様々な炉心配置の出力分布と増殖性能の検討結果からシード燃料集合体を放射状に配置したとき中性子束が炉心外周部まで高く、増殖に良いという結果が得られた。また、過剰な水素化ジルコニウムは周囲の中性子スペクトルを軟化させ、増殖性能が落ちるので、負のポイド反応度を得られる範囲で水素化ジルコニウムを含むブランケット燃料集合体数を減らすことにした。その炉心配置図と性能を図 7 と表 4 に示す。複合システム増倍時間 40 年を切る増殖性が達成されている。

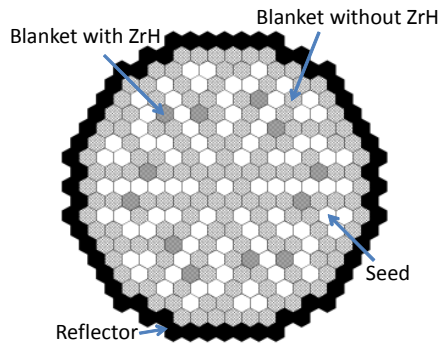


図 7. 炉心配置図

表 4. 低減速 BWR 冷却水密度での増殖性

	本研究	RBWR
熱出力[MW]	2930	3926
冷却水密度[g/cm ³]	0.248	0.248
炉心高さ/等価直径 [m]	4.40 / 4.12	1.255 / 7.37
燃料集合体数(シード/ZrH無/ZrH付ブランケット)	91 / 150 / 12	900
パッチ数(シード/ブランケット)	4 / 1	6.8
運転サイクル [d]	550	456
核分裂性プルトニウム富化度[wt.%]	16.5	18.1
シード平均燃焼度 [GWd/t]	56.1	50.0
ポイド反応度 (BOEC / EOEC) [%Δk/k]	-0.62 / -0.37	Negative
核分裂性プルトニウム残存比 (Discharge / Loading)	1.397	1.04
核分裂性プルトニウム残存比 (EOEC / BOEC)	1.030	1.006
複合システム増倍時間 [y]	37	245

次に PWR の冷却水密度 (0.69g/cm³) で検討を行った。シード燃料集合体の炉心配置について分散型、径方向非均質型、放射型を検討し、図 8 に示す放射型の配置が負の冷却水ポイド反応度を満たして最もよい増殖比与えた。その性能を表 5 に示す。燃焼とともに水素化ジルコニウムの周囲にプルトニウムが蓄積し、炉心の核的結合がよくなる。水素化ジルコニウム無の炉心に比べて中性子増倍率の低下が少なく、負の反応度を満たして増殖できる。PWR の冷却水密度で核分裂性プルトニウム残存率 1.0 を超えることを初めて示した。

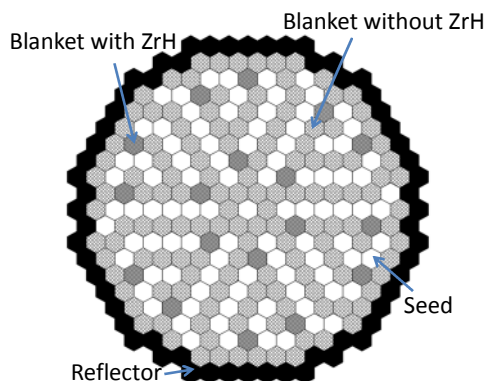


図 8. 炉心配置図

表 5. PWR 冷却水密度での増殖性

熱出力[MW]	2552
冷却水密度[g/cm ³]	0.692
炉心高さ/等価直径 [m]	4.00 / 4.
燃料集合体数(シード/ZrH無/ZrH付ブランケット)	97 / 138 /
パッチ数(シード/ZrH無/ZrH付ブランケット)	4 / 8 / 1
運転サイクル [d]	400
核分裂性プルトニウム富化度[wt.%]	15.2
シード平均燃焼度 [GWd/t]	27.6
ポイド反応度 (BOEC / EOEC) [%Δk/k]	-0.40 / -0
核分散性プルトニウム残存比 (Discharge / Loading)	1.342
核分散性プルトニウム残存比 (EOEC / BOEC)	1.013
複合システム増倍時間 [y]	95.9

(4) 結論

高速・熱中性子結合炉心の SRAC による解析精度を評価し、その核設計解析法を開発した。

軽水冷却による高増殖の可能性を核的な検討により初めて示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Yoshiaki Oka, T. Inoue, T. Yoshida, "Plutonium breeding of light water cooled fast reactors", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 50, Issue 1, pp.15-20 (2013), 査読有 DOI:10.1080/00223131.2013.750053

② Qingjie Liu, Yoshiaki Oka, "Core design for super fast reactor with all upward flow core cooling", Annals of Nuclear Energy 57, pp.221-229 (2013), 査読有 <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.058>

[学会発表] (計 6 件)

① Yoshiaki Oka et al., "Progress of Super Fast Reactor and Super LWR R&D, ISSCWR6-13035, March 4-7, 2013 Shenzhen, China (key note presentation)

② Yuki Honda and Yoshiaki Oka, "Accuracy of Nuclear Analysis of Fast and Thermal Neutron Coupled Core", ISSCWR6-13010, March 4-7, 2013 Shenzhen, China

③ Yuki Honda and Yoshiaki Oka, "高速熱中性子結合炉心の核解析精度 (Accuracy of Nuclear Analysis of Fast and Thermal Neutron Coupled Core)", 日本原子力学会秋大会, 広島, 2012/09/20

④ Yoshiaki Oka and Takashi Inoue, "新燃料集合体による水冷却高速炉の増殖性 (1) PWR 冷却水密度 (Plutonium breeding of light water cooled fast reactors with new

fuel assemblies(1) PWR coolant density)", 日本原子力学会秋大会, 広島, 2012/09/20

⑤ Taishi Yoshida and Yoshiaki Oka, "新燃料集合体による水冷却高速炉の増殖性(2) 低減速 BWR・スーパー高速炉冷却水密度 (Plutonium breeding of light water cooled fast reactors with new fuel assemblies(2) Reduced moderation BWR and Super FR coolant density)", 日本原子力学会秋大会, 広島, 2012/09/20

⑥ Y. Oka, "(SC19) Plant dynamics and control" ICTP-IAEA Course on Science and Technology of Supercritical Water-Cooled Reactors, The Abdus Salam international center for Theoretical Physics (ICTP) Trieste, Italy, 27 June to 1 July 2011

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

①名称: 燃料集合体、炉心および水冷却型原子炉

発明者: 岡 芳明

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: PST/JP2012/061424

出願年月日: 24 年 4 月 27 日

国内外の別: 国際

②名称: 燃料集合体

発明者: 岡 芳明

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: 特願 2012_024503

出願年月日: 24 年 1 月 23 日

国内外の別: 国内

③名称: 燃料集合体

発明者: 岡 芳明

権利者: 早稲田大学

種類: 特許

番号: 特願 2011_114129

出願年月日: 23 年 5 月 2 日

国内外の別: 国内

[その他]

(1)共同 PR wire(2013 年 3 月 12 日)

Waseda University, World's first conceptual nuclear reactor design of high plutonium breeding by light water cooling (Yoshiaki Oka, Professor, Cooperative major in Nuclear energy, Waseda University and his team)

(2)日経産業新聞 (2012 年 12 月 27 日 7 面)

日刊工業新聞 (2012 年 12 月 27 日 14 面)
電気新聞 (2012 年 12 月 27 日 1 面)

(3)早大プレスリリース 2012 年 12 月 10 日
世界初、軽水冷却による高増殖性能の達成について

(4)ホームページ等

<http://www.f.waseda.jp/okay/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

岡 芳明 (OKA YOSHIAKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 40011225

(2)研究分担者

石渡 祐樹 (ISHIWATARI YUKI)

東京大学・工学(系)研究科・講師

研究者番号: 10334319

(3)連携研究者

山路 哲史 (YAMAJI AKIFUMI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・次世代原子力システム研究開発部門・研究員

研究者番号: 00571704