

平成22年3月31日現在

研究種目： 基盤研究(B)
 研究期間： 2007～2009
 課題番号： 19360421
 研究課題名（和文） 神経・知能系を有する自律安全原子力エコエネルギー供給システム
 研究課題名（英文） Development of Multi-purpose Safety and Eco-Nuclear Energy Supply System with Sensors and Artificial Neural Network
 研究代表者
 奈良林 直 (NARABAYASHI TADASHI)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号： 10419947

研究成果の概要（和文）：スイスにおける原子力熱エネルギー供給システムの詳細調査を踏まえ、住民の要望や地域の要求を満たすシステムについての概念形成を地域住民と共同で検討し、北海道内3000世帯の中都市に原子炉からのエネルギー供給システムの検討を実施した。可燃性毒物としてガドリウムとエルビウムを酸化ウランに混入することにより、10年間燃料交換なしで運転できる炉心が構成できること、1°C/5kmの温度降下で長距離熱輸送が可能なこと、神経・知能系を取り付けた原子炉機器による予兆検知実験とその解析シミュレーションを実施し、ポンプ、バルブ、炉内機器の異常検知が可能であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： Nuclear power plants have a number of advantages, as they do not produce carbon dioxide, and fuel loaded in a reactor core has a stockpiling effect to be advantageous in terms of Japan's energy security. This reactor is based on small PWR. It's thermal output is 30MWth and it's maximum electrical output is 10MWe. This reactor supply electricity for 3000 houses. This system aims to supply all energy for life, heat, electricity and hydrogen for fuel cell car. As a hot water pipeline test result, the water temperature was kept high enough, and this thermal calculation method was applied for actual size pipeline. The result of heat loss calculation was about 1 °C / 5km. An online monitoring system with sensors and artificial neural network enable to detect abnormal signal of pumps, valves and reactor internals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：原子力工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：革新的小型安全炉、神経・知能系、自律安全原子炉、エコエネルギー供給システム、地域熱供給、水素製造、予兆検知システム、ニューラルネットワーク

1. 研究開始当初の背景

北海道は冬季のエネルギー需要が大きく、我が国の中でも最も石油価格の高騰の影響を受けやすい地域である。一例を挙げると、平成17年度の札幌市の除雪費用は180億円に達した。除雪費用の内容は運搬、融雪、排雪である。各家庭の暖房は石油ストーブであり、多量の灯油を暖房に使用している。我が国の国家戦略である、「原子力立国」の「要」となるシステムである。しかし、地域住民の共感を得ることが一番重要な課題である。

欧米では既に地球環境保全の観点から原子力エネルギーシステムの重要さが再認識され、原子力発電の反対の急先鋒であったグリーンピースさえ、「地球環境を救うには原子力発電しか無い」主張し始めた。

原子力発電フィンランドには最新鋭の欧州型加圧型原子炉（EPR）の初号機建設が決定され、原子力発電が全電力の8割を超えるフランスでも2号機が建設されることとなった。米国でも原子力ルネッサンスとして原子力回帰を鮮明にした。優秀な運転実績を誇る原子炉を多数保有する米国の電力会社の株価は原油高騰下で上昇している。アラスカでは日本が開発した小型増殖炉システムの誘致を決定した。また、北海道と同様に「北方圏」に属し、山岳部に降雪の多いスイスでは、既に20年以上にも亘り、原子力エネルギーシステムから熱エネルギーが130kmに達する給湯配管を用いて2000世帯を超える多くの家庭に供給されている。たった40世帯の小さな村にも給湯パイプラインが敷設され、全室床暖房の家屋で豊かな暮らしをしている。しかるに、我が国における原子力システムの展開は度重なる原子力発電所のトラブルと原子力に対するネガティブな論調のマスコミ報道の影響を受けて極めて遅れている。今年の冬の大雪により、屋根の除雪時に誤って落下し、死亡した方が150名に達したのが日本の現状である。この悲惨な状況の解消には、「原子力は安全か危険か」の不毛な議論の継続ではなく、地域住民がメリットを享受し、安心して採用できるエネルギー供給システムにまで安全性・信頼性を向上する研究開発が必要である。すなわち、一般住民が原子力システムに魅力と十分な安心を感じるハードウェアとシステムを構築する必要がある。このような基本コンセプトの構築が大学に求められている。

2. 研究の目的

本研究ではこのような観点に立ち、信頼性・安全性を最優先した環境保全型原子力エ

コ・エネルギー供給システムと、些細な故障や事故の予兆を察知して修復システムを自動起動させる「神経・知能系」を組み合わせ、自律安全型の多目的エネルギー供給システムを構築することを目的とする。

3. 研究の方法

原子力の有効利用を主眼に据え、北海道を中心とする北方圏における地域の特徴を踏まえたエネルギー需要調査を実施し、これらの安全性を高めた「安心できる独創的なシステム」と「地域に密着した需要調査」に基づき、地域住民と共同でシステムの開発研究を進める。本研究では、上記の研究目的に沿って、以下の3項目を実施する。

1)超小型自律安全原子炉システム

神経・知能系による予兆検知シュミレータ
簡素化機器・安全システム

2)地域共生を主眼とした多目的システム

カートリッジ炉心による燃料交換に伴う
運転停止期間の短期化と多目的エネルギー供給システムの高度化

3)地域住民との対話を通じた安心感・信頼感の醸成

4. 研究成果

道内では約3000~15000世帯程度の町が散在しており、冬季の熱需要を想定すると熱出力は約30~150MW t hとなる。原子炉圧力容器を開けて行う燃料交換は人手もかかり、このような大都市では人的な負担が大きいことから、燃料を一括交換可能な密封式カセット炉心とする。これは定検時の原子炉停止期間を大幅短縮が可能である。北海道と同様に北方圏に属するフィンランドのオルキオト発電所の燃料交換時の原子炉の停止期間は約7日である。地域住民にとって原子力発電所は大切に、原子炉の停止期間を最小にするため、徹底した状態監視保全とスペアパーツの準備など様々な工夫が成されている[6]。本研究においてはこの実績に加え、カセット炉心の採用により、燃料の1体毎の交換作業を無くして、原子炉の停止期間3日を目指す。炉心は約10年間燃料交換なしで運転できることを目指した炉心設計を行う。新規炉心燃料は、工場でカートリッジ形式に一体化したものを船とトラックにより現地に輸送して、据付ける。

現在の原子力発電所は、火力や水力発電所とのいわゆるベストミックスにより、定格出力100%で運転されているが、熱供給は基本的にタービンの最低圧段に近い低圧の蒸気を用いて熱供給するので、電気出力の低下はそれ

ほど大きくない[4]。

水素製造については、電気分解によるものが既に実用化され市販されている。住商エアウォーター社製 IMET-60[7]を8基用いると2 MWe の余剰電力で、約 400Nm³/h の水素が得られる。圧縮水素を製造できるので燃料電池車用の高圧ポンペに充填できる。

このように原子炉からのエネルギー供給システムを検討していくと、Fig.1 に示すように、発電、給湯・冷暖房、融雪と水素製造を同時に行い、生活に必要なほぼエネルギーの全てを供給することが可能である。

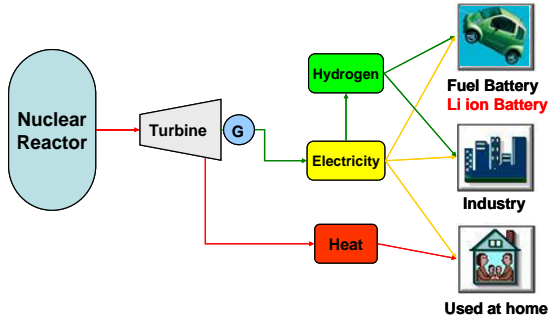


Fig.1 Total district energy supply system using nuclear for homes, industries and transportations

安全系には、水素ガスタービンを用いた動的炉心注水システムと蒸気インジェクタ (SI) を用いた静的炉心注水システム[8]を採用した。Fig.2 に本研究で開発中の CO₂ フリー原子力エネルギーシステムの3次元 CAD イメージ図を示す。

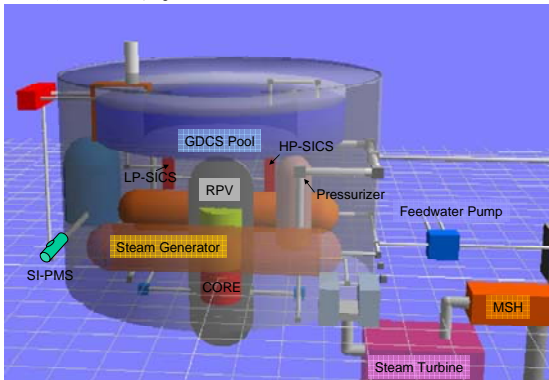


Fig.2 3-D CAD view of a small nuclear power plant[8]

格納容器内には原子炉圧力容器と2基の水平型蒸気発生器 (SG)、加圧器1基を配置して格納容器の高さを抑えている。Fig.3 は、本研究の原子炉系および蒸気タービンと給復水系を含む BOP 系のヒートバランスを示す系統線図である。給水加熱器は蒸気インジェクタ簡素化給水系 (SI-FWH) を採用しており、給水流量は約 4kg/s である。この流量の多段蒸気インジェクタの実流量試験は、東京電力と東芝で実施した、経済産業省革新的原子力技術開発公募事業および、イタリアの火力発

電所の蒸気を用いた SIET 社の試験で、技術開発および耐久性試験を実施済みである[8]。

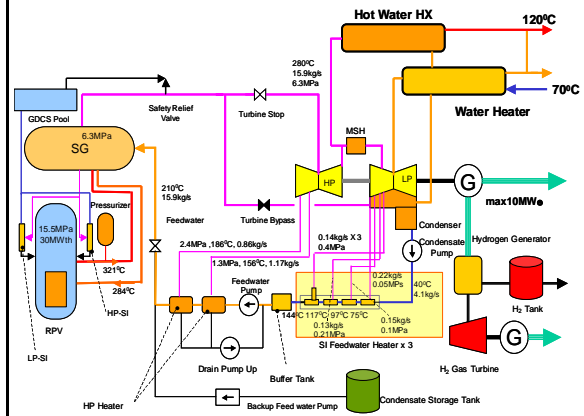


Fig.3 Heat and mass balance of the small nuclear power plant (30MWe)

地域共生の実例として、スイスのベツナウ原子力発電所の地域熱供給の現地調査を行った。スイスでは CO₂ を排出する火力発電の割合は Fig.4 に示す通り、わずか 1.4%で、水力と原子力が主な電力供給源である[5]。Fig.5 に発電所の外観写真を示す。Fig.6 は REFUNA 社の給湯パイプラインを示した図である。パイプラインの総延長は 130km に及ぶ。著者らが現地調査を依頼した結果、Fig.7 に示す熱供給用の2次熱交換器や Fig.8 に示す熱エネルギーの供給を受けている町とその町の住民である一家庭を見学することができた。

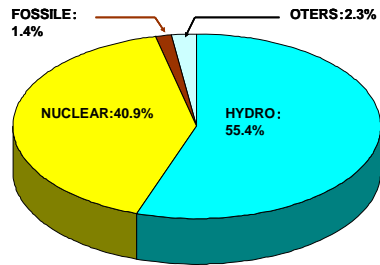


Fig.4 Electricity share in Switzerland (IAEA,2002)



Fig.5 Beznau nuclear power plant and hot-water pipelines[5]

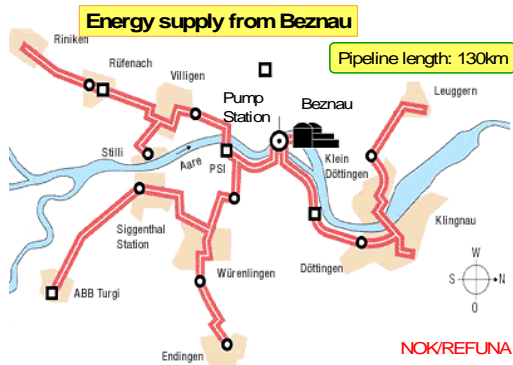


Fig.6 Hotwater Pipelines from Beznau nuclear power plant (NOK/REFUNA)[5]



Fig.7 Heat exchanger for hot water pipelines in Beznau nuclear power plant[5]



Fig.8 A town near the Beznau nuclear power plant and a hot water pipeline[5]

約 2300 世帯、約 2 万人が熱利用の需要家となっている。Fig.9 は、見学させていただいた一般家庭の車庫に設置された原子力発電所からの熱供給設備である。Fig.10 に示す実機の長距離熱輸送ループのうち、基幹熱交換器と各家庭内の熱交換器を除く、熱輸送パイプラインの断熱性能を確認する試験を行った。

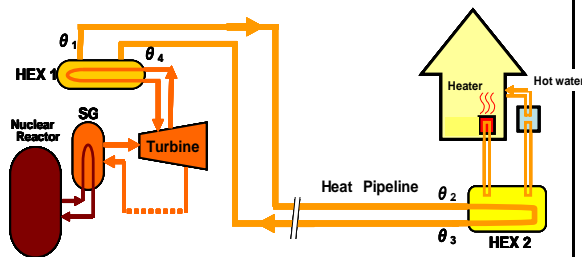
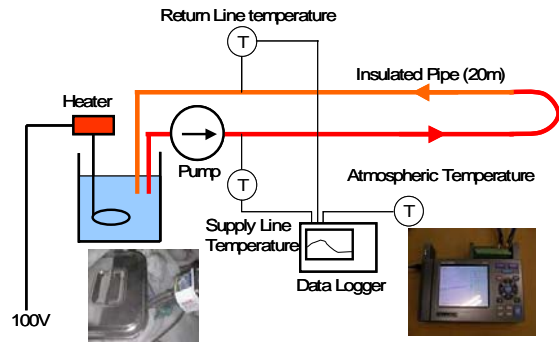
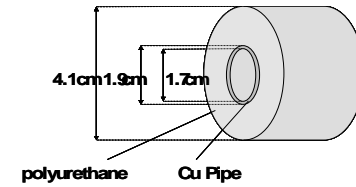


Fig.10 Heat Pipeline for long distance heat transport



(a) Test loop



(b) Test pipe covered with polyurethane

Fig.11 A small-scale hot water test loop

スイスのベツナウ発電所の熱輸送性能は5km 当たりでわずか 1°Cの温度低下しか無い。50km で約 10°Cである。Fig.11(a)に示す通り、1kW のヒーターで温水を作り、熱輸送ループの供試配管に不凍液を混入した温水を供給し、戻り水との温度差から漏れ熱による放熱量を測定した。使用した供試配管の外観と寸法を Fig.11(b)に示す。流量を 1/10 の 0.1kg/min (0.1L/min)に減らして、温度差に有意な差が付くようにして測定した。1 ケース約 3 時間の測定を行った。試験結果を Fig.12 に示す。

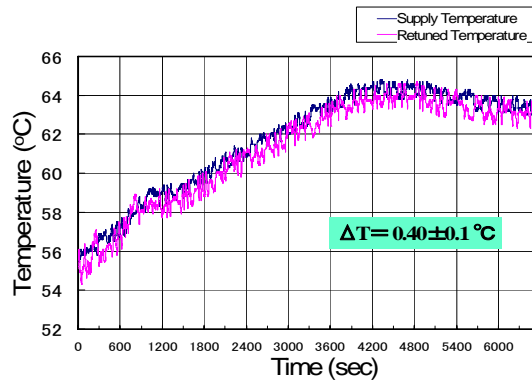


Fig.12 Temperature data of hot water loop

$$Q = \frac{(\theta_i - \theta_r)}{R} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0\alpha_1} + \frac{1}{r_2\alpha_2} + \frac{1}{\lambda_0} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2)$$

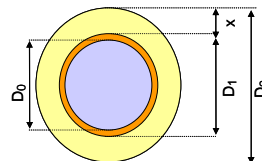


Fig.13 Dimensions of polyurethane insulated pipe

測定開始後 30 分 (1800s) 以降の温度が安定してからの温度差の時間平均値は 0.4°C であった。以上の縮小モデルによる熱輸送試験結果を以下に示す熱伝熱モデルにより解析評価を行った。

次いで、実機パイプラインの性能評価を実施した。

3000 世帯への熱供給を 3 系統に分け、1000 世帯あたり 10MWth の熱輸送を行うと 1 世帯あたりでは 10kWth 熱輸送を行うことができる。スイスのベツナウ発電所と同様に $\theta_1 = 120^\circ\text{C}$ の温水を送り、 $\theta_4 = 70^\circ\text{C}$ で戻す[3]と仮定すると、必要熱輸送量 $P(\text{kWth})$ を満たす温水流量 $G(\text{kg/s})$ は、比熱 $CP (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$ とし

$$G = P / [G C_p (\theta_1 - \theta_4)] \quad (3)$$

より、最大熱輸送量 $P = 10\text{MWth}$ には $G = 50\text{kg/s}$ 、年平均 $P = 11.3/3 = 3.8\text{MWth}$ では、 $G = 18\text{kg/s}$ となる。Fig.13 に示す配管形状および保温材の厚さ、流量が 20kg/s 一定の時の漏れ熱をパイプの内径を横軸にして表したグラフを Fig.14 に示す。

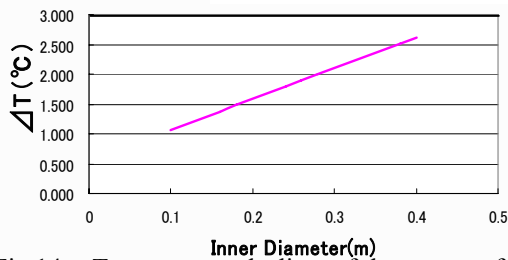


Fig.14 Temperature decline of hot water for various inner-diameter pipeline during 5 km transport

Fig.12 に示した配管形状で、断熱材であるポリウレタンの厚さと熱損失との関係を計算した結果が Fig.14 のグラフである。熱損失を 5km で 1°C 程度に抑えるためには、ポリウレタンの保温材厚さを数 cm から約 20cm 程度必要なことがわかる。

一例として長沼町の例[9]を Table 1 に示す。長沼町は Fig.17 に示す通り、東西 15.5km、南北 21.1km に広がる面積 168km² の町で、札幌市まで 30km、新千歳空港まで 28km、苫小牧港まで 50km の位置にある。

Table 1 Energy consumption of 3000 families at Naganuma Town in 2003 [9]

Energy Source	Year Average	Winter Peak	Summer Bottom
Electricity	3.2MWe	4.3MWe	2.6MWe
Oil	11.3MWth	22.1MWth	3.3MWth



Fig.17 Location of Naganuma Town [9]

本研究で炉心は燃料中に制御棒を挿入した状態で一括交換可能な Fig.18 に示すカセット式炉心を採用した。

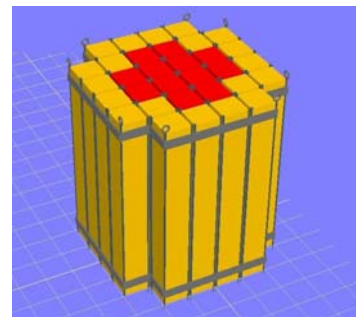


Fig.18 Cassette-type Core

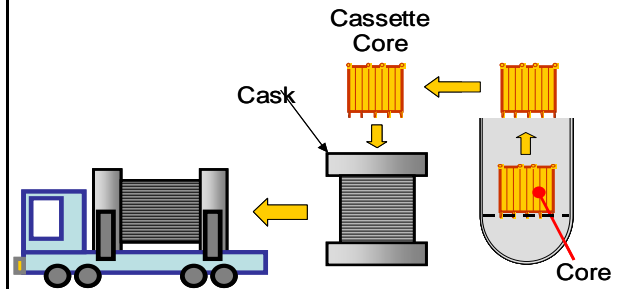


Fig.19 Transport of a cassette-type Core

Fig.20 は円筒近似した炉心の実効寸法である。まず、バックリング水の反射体厚さ δ は中性子の外挿距離 10cm と等しいと仮定する[10]。Table 1 で少し余裕を持たせ、10 年間、15MWth の年平均熱出力で運転し続けたとすると、炉心の燃焼度 Bu は、Fig.21 に示す燃料集合体 32 体で、ウランの装荷量が 1.97t であるので、 $Bu = 365.25\text{day} \times 10\text{year} \times 15\text{MW} / 1.97\text{t} = 27,880 \text{ MWD/t}$ となる。濃縮度 5% 以下の規制値を満足するので、10 年間運転可能な炉心は成立する。

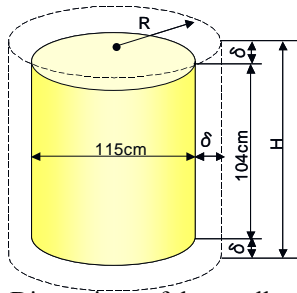


Fig.20 Dimensions of the small core

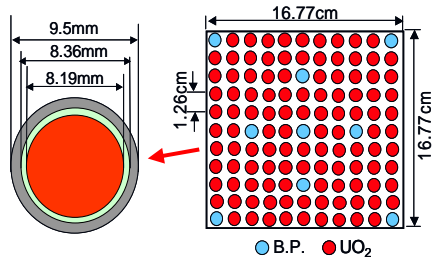


Fig.21 Layout of fuel a bundle

燃焼度と無限増倍率の関係

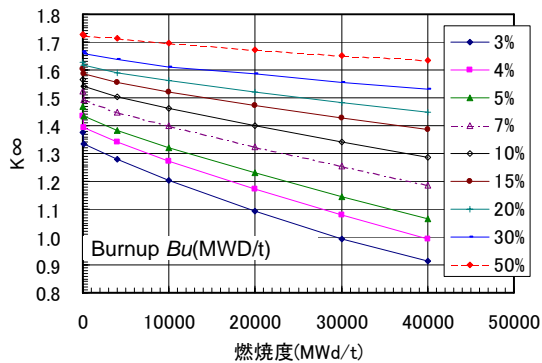


Fig.22 Burnup characteristics of K_{∞}

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

(1) 奈良林 直、村瀬敏博、島津洋一郎、日本混相流学会誌、23 巻、1 号、(2009)、66-76

〔学会発表〕 (計 11 件)

(1) M. Imamura, K. Sato, T. Narabayashi, Y. Shimazu, and M. Tsuji: "A Study of a Small Nuclear Power Plant System for District Heating" (ICAPP09), CD-ROM(9424.pdf), (May, 13 2009), Tokyo, Japan
 (2) T. Narabayashi, Y. Shimazu, K. Sato, M. Imamura, and M. Tsuji: "Development for Multi-purpose Nuclear Energy Supply System" (ICAPP09), CD-ROM(9213.pdf), (May, 12 2009), Tokyo, Japan
 (3) K. Sato, Y. Shimazu, T. Narabayashi, and M. Tsuji: "Modification of Japanese First Nuclear Ship Reactor for a Regional Energy Supply System Using Gadolinia as a Burnable Poiso

n" (ICAPP09), CD-ROM(9350.pdf), (May, 12 2009), Tokyo, Japan

(4) M. Okumura, M. Tsuji, and Y. Shimazu: Proceedings of 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants(ICAPP09), CD-ROM(9287.pdf), (May, 12 2009), Tokyo, Japan

(5) T. Hirayama and Y. Shimazu: "Small PWR "PFWR50" using Cermet Fuel of Th-Pu Particle" (ICAPP09), CD-ROM(9363.pdf), (May, 12 2009), Tokyo, Japan

(6) T. Narabayashi, Y. Shimazu: "Regional Collaboration on Development for Multi-Purpose Nuclear Energy Supply System" 16th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC2008), CD-ROM, pp.1045, (October, 16 2008), Aomori, Japan

(7) 奥村基史、辻雅司、島津洋一郎、奈良林直; 「自己組織化マップ機能を持つ人工ニューラルネットワークによる原子炉安定性診断」、2008 年度可視化情報全国大会講演論文誌、28[2]、B 4 0 9、(2008.10.11)、釧路

(8) K. Sato, Y. Shimazu, T. Narabayashi, M. Tsuji: "Modification of the Japanese First Nuclear Ship Mutsu Reactor for a Regional Energy Supply" ICAPP08, (June, 10 2008), ANAHEIM, CA, USA

(9) K. Kamiyama, Y. Shimazu, T. Narabayashi, M. Tsuji: "Mixed Plutonium Conversion and Actinides Burning in Fast Molten Salt Reactors" (ICAPP08), CD-ROM (8033.pdf), (June, 10 2008) ANAHEIM, CA, USA

〔その他〕

ホームページ等

<http://roko.eng.hokudai.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奈良林 直 (NARABAYASHI TADASHI)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：1 0 4 1 9 9 4 7

(2) 研究分担者

島津 洋一郎 (SHIMAZU YOICHIRO)
 北海道大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：6 0 3 1 2 3 7 8

(3) 連携研究者

辻 雅司 (TSUJI MASASHI)
 北海道大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：7 0 0 9 1 4 7 8