

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82110
研究種目：特別推進研究
研究期間：2011～2014
課題番号：23000005
研究課題名（和文） 加速器中性子利用 99Mo 等医学用 RI 生成開発研究
研究課題名（英文） Development of Medical Radionuclides Produced by Neutrons from Accelerator

研究代表者
永井 泰樹 (NAGAI, Yasuki)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力エネルギー基盤連携
センター・客員研究員
研究者番号：80028240
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：304,200,000 円

研究成果の概要（和文）：

放射性同位体(RI)を含む医薬品は核医学診断及び治療に重用されている。本研究では、加速器で得られる中性子を用い診断用 99mTc の親核 99Mo 及び 64Cu、がん治療用 90Y 及び 67Cu を独自の方法で生成し、高品質の 99mTc、64Cu、67Cu 及び 90Y を分離・精製する開発研究を成功裏に行った。実際、本製法による 99mTc の医薬品は市販の 99mTc 医薬品と同等であることをマウスの画像撮影等により確認した。また高品質の 67Cu を多量に生成する方法を初めて確立し、今後の 67Cu 医薬品の創薬へ向けた研究に目処を立てた。

研究成果の概要（英文）：

Radiopharmaceuticals containing radioisotopes play an important role in nuclear medicine imaging and radioimmunotherapy. The present study was performed to develop new production routes of medical radioisotopes of 99Mo and 64Cu for diagnosis use and 90Y and 67Cu for therapy by using neutrons obtained from an accelerator. We have successfully obtained high quality 99mTc from 99Mo by thermochromatography and 64Cu, 90Y and 67Cu by ion ion chromatographic separations. These results provide important evidence that high-quality medical radioisotopes can be produced using neutrons from an accelerator with a minimum level of radioactive waste, and without using uranium.

研究分野：数物系科学、化学、医歯薬学

キーワード：原子核（実験）、核医学、核・放射化学、放射線科学、加速器

1. 研究開始当初の背景

(1) 放射性同位体(RI)を含む医薬品は核医学診断及び治療に重用されている。99Mo の娘核種 99mTc を含む診断用医薬品は我国で年間 90 万件、90Y 医薬品は癌治療に利用されている。我が国は短半減期 66 時間の 99Mo 及び 64 時間の 90Y を輸入している。ところが、99Mo を製造してきた原子炉が高経年化で計画外停止を頻発している事、高濃縮ウランを使用している事から 99Mo の供給が不安定になっている。そのため、加速器等による 99Mo の代替製造法の確立が世界の喫緊の課題である。

(2) 90Y は輸入に数日要するため比放射能が減じ薬剤化に困難が生じている。そのため新鮮な 90Y の利用を可能とする国産化が急務である。64Cu は半減期 13 時間の長い新 PET 核として利用拡大の可能性を持っており、高品質の 64Cu を多量に生成する方法の開発が待

たれている。67Cu は診断・治療両用 RI として期待されており 30 年余にわたり製造法の開発が行われているが、実用化の目途は立っていない。そのため 67Cu を用いた医薬品の研究開発も進まず医学現場で大きな課題となっている。この様な状況下で研究代表者らは、加速器で得られる中性子(加速器中性子)を用いて上記 RI を生成する新方式を提案した。しかし、その実験的研究は未だ行われたことは無い。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、「加速器中性子のみを用い医学用 RI の 99Mo、64Cu、90Y 及び 67Cu を製造する」新方式で実際にこれら RI を生成しその医療利用を実現すべく、生成、分離、精製法の開発を目的とする。99Mo については、加速器中性子で生成される 99Mo の比放射能は市販の 99Mo に比べ数千分の 1 と低い。この様な低い比放射能 99Mo から 99mTc を分離す

るために従来熱分離法が開発されてきた。しかし、実用化を妨げる課題がある { ^{99m}Tc 熱分離効率が、多数回にわたる分離や溶融 MoO_3 試料厚が 0.8mm より厚い場合には激減する}。この課題を解決すると共に得られる ^{99m}Tc の品質 (放射核種純度、放射化学純度、化学純度) が市販品等と同品質であることを検証する。

(2) ^{90}Y 及び ^{64}Cu については、加速器中性子で生成するための最適の条件を明らかにし、化学分離・精製法の確立と標識率の測定を行う。更に ^{64}Cu を利用したがん診断用 PET 薬剤開発のため、ヘマトポルフィリン (HP) およびその誘導体を ^{64}Cu で標識した ^{64}Cu -HP 誘導体 (^{64}Cu -HPDs) を合成し、その物理化学的性質を調べるとともに、担がんモデルマウスを用いた動物実験により ^{64}Cu -HPDs のがん集積性などの基礎的な性質を明らかにする。 ^{67}Cu については、 $40\sim 50\text{MeV}$ の重陽子を炭素等の標的に照射し加速器中性子を発生させる。この中性子を用いて ^{67}Cu を生成し、その放射性核種純度を調べ、また化学分離・精製法を確立する。また、 $^{64/67}\text{Cu}$ を安定にキレートさせるための配位子の探索、腫瘍集積性を示す抗体・ペプチドプローブを $^{64/67}\text{Cu}$ で標識し、体内動態・インビボイメージングに関する検討を行うことで、医療用 RI として新規開発された $^{64/67}\text{Cu}$ の有効性を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) ^{99}Mo 、 ^{90}Y 、 ^{64}Cu 、 ^{67}Cu は、原子力機構の加速器で得られる高速中性子を用い $^{100}\text{Mo}(n,p)^{99}\text{Mo}$ 、 $^{90}\text{Zr}(n,p)^{90}\text{Y}$ 、 $^{64}\text{Zn}(n,p)^{64}\text{Cu}$ 、 $^{68}\text{Zn}(n,x)^{67}\text{Cu}$ 反応で生成する。生成した RI から無担体の RI を分離精製するため、 ^{99}Mo については熱分離法を採用し、 ^{90}Y 、 ^{64}Cu 及び ^{67}Cu はイオン交換法で行う。熱分離法は上述した長年の課題解決のために、独自の熱分離装置を製作し、電気炉内で ^{99m}Tc が分離される過程をオンラインで測定できる新システムを構築する。そして、加速器で照射された MoO_3 試料から高品質の ^{99m}Tc を多数回の分離に対して高分離効率で得る条件を探る。得られた ^{99m}Tc の品質が市販の ^{99m}Tc と同等であることを、放射性核種純度についてはガンマ線測定により、放射化学純度については医薬品候補化合物についての標識率測定で、化学純度については質量分析器等で確認する。更に抽出した ^{99m}Tc は、既存医薬品の中から適切な配位子を選択し標識化を行い、マウスに注射し画像撮影を行い、市販の ^{99m}Tc による画像と比較する。

(2) ^{90}Y 、 ^{64}Cu 及び ^{67}Cu についても、生成直後及び分離精製後の放射核種純度をガンマ線測定により調べる。 ^{90}Y の標識率及び放射化学的純度の比較に適当なモデル配位子を合成

する。 ^{64}Cu 及び ^{67}Cu 標識化に関しては、オクトレオタイドなどの腫瘍集積性ペプチドに DOTA を配位子として結合させたモデルプローブを合成し、 $^{64/67}\text{Cu}$ で標識して体内動態を臓器摘出法により検討する。又、新規配位子として官能基を種々変更した誘導体を合成する。それと共に、がんの特異的な抗体、ペプチドを母体として、 ^{64}Cu 標識 PET 用薬剤を設計、合成する。更に、

(3) 加速器中性子を照射後の大量 RI から目的とする医薬品原料核種の化学処理を行い、高品質の ^{99m}Tc 及び ^{90}Y を遠隔手法により分離精製すると共に、高価な高濃縮 ^{100}Mo 試料及び ^{90}Zr を再利用するために回収する装置の設計・試作を行う。高強度の加速器中性子源については、大型銅円盤上にトリチウムを吸蔵する能力が高いチタンを蒸着、これをトリチウムガス中にセットし製造する。

(4) 腫瘍に発現する幾つかの標的タンパク質に結合するペプチド、抗体を母体とする放射性分子プローブを設計する。蛍光色素や ^{111}In 、 ^{68}Ga などの放射性核種で標識したプローブで基礎検討を行い、良好な体内動態を示したプローブについては ^{64}Cu 標識を行って、腫瘍イメージングの検討を行う。また、銅結合タンパク質であるアルブミンの銅結合モチーフを母体とした新規アミノ酸配位子を合成し、その安定性評価を行う。

4. 研究成果

(1) $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$:

平均エネルギー 14MeV の加速器中性子を ^{100}Mo に照射して ^{99}Mo を生成する時に同時に生成される不要な RI は ^{97}Zr (半減期 17 時間) でその量も微量であることを確認した。 ^{99}Mo から ^{99m}Tc を熱分離する際、電気炉内温度を 800 度 C 近傍にセットし MoO_3 試料を溶融し分離精製することが、高い分離率で多数回の分離を実現する上で重要であることを明らかにした。また、溶融時に Tc の酸化を促進するために電気炉内に流入する酸素ガスに湿気を含ませると分離率も向上し、分離時間も短縮できる新現象を発見した。この条件下では、溶融 MoO_3 試料の厚さが 17mm 程度でも高分離率が得られることを実証酸た。この結果は高分離率は 0.8mm の厚さ程度までとする従来の結果を超える結果であり、多量の MoO_3 試料を用いる加速器中性子利用の ^{99}Mo 生成に目途をつけた。また、本研究で得た ^{99m}Tc 医薬品によるマウス画像が市販品の ^{99m}Tc 医薬品による画像と同等であることを実証し、実用化に向け大きく前進した。

(2) ^{90}Y :

加速器中性子エネルギーを幅広く変えて ^{90}Y の効率的生成を調べた結果、平均エネルギー 14MeV の中性子が最適であることを初

めて検証した。また化学分離精製法を確立すると共に医薬品候補薬に対し 90%の標識率を達成し、実用化に大きく前進した。

(3) ^{64}Cu :

平均エネルギー14MeV の加速器中性子を ^{64}Zn に照射して ^{64}Cu を生成する時に同時に生成される不要な Cu の RI は殆ど無いことを確認し、多量生成能力と併せ上記反応が ^{64}Cu 生成に優れている事を示せた。

(4) ^{67}Cu :

40~50MeV の重陽子を炭素等に照射して作られる中性子を ^{68}Zn に照射して生成される ^{67}Cu の放射核種純度を調べた。その結果、高エネルギー陽子を用い ^{67}Cu を生成する従来法よりも高純度の ^{67}Cu が得られることを実証した。また、高品質の ^{67}Cu 及び ^{64}Cu を得ると共に高価な Zn 試料を高回収率で回収できる化学分離・精製・回収法を確立した。そして医薬品モデル化合物に対し高い標識率を得、 ^{67}Cu 及び ^{64}Cu 医薬品開発へ向け大きな成果を得た。

(5) ^{64}Cu 医薬品開発:

精製したヘマトポルフィリン HP に ^{64}Cu 約 250 MBq を加え、加熱反応により $^{64}\text{Cu-HP}$ につき標識率 90-95%を得た。(図 1)

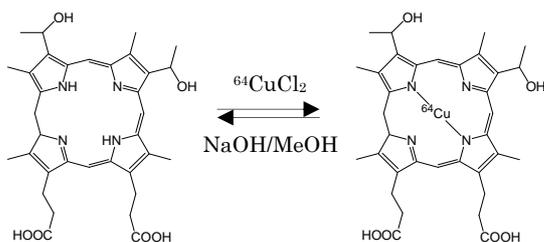


図 1 $^{64}\text{Cu-HP}$ の標識反応

ヒト乳腺がん細胞、ヒト結腸腺がん細胞、マウス扁平上皮がん細胞をヌードマウスの腹側部に移植し、 $^{64}\text{Cu-HP}$ を尾静脈より投与し、PET 撮像実験を実施した結果、いずれのがん細胞においても $^{64}\text{Cu-HP}$ の集積が認められ、 $^{64}\text{Cu-HP}$ を用いたがん診断の可能性が示された(図 2)。しかしながら HP は溶解度が低く、注射剤として投与が困難であること、また肝臓への高い集積を認めたことから、物理化学的性質の改善を目的とした誘導体の開発が必要と考えられた。

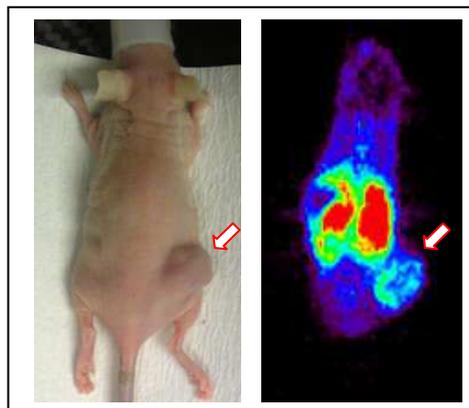


図 2 $^{64}\text{Cu-HP}$ 投与 24 時間後の PET 画像

また、 ^{111}In 、 ^{68}Ga 等で標識した抗体は、インビボで治療効果判定が可能な有用なプローブであることを見出した。そこで本プローブを ^{64}Cu で標識し、精製したところ、 ^{64}Cu 標識抗体を放射化学的純度 98%以上の高純度で得ることに成功した。腫瘍に浸潤するリンパ球を標的とする ^{64}Cu 標識抗体プローブを開発し、担がんマウスに投与したところ、明瞭な腫瘍イメージングを達成した。

銅結合モチーフを母体とした新規アミノ酸配位子のうち、安定性が高かった配位子を腫瘍標的ペプチドに結合させ、 ^{64}Cu 標識を行って担がんマウスに投与したところ、明瞭な腫瘍イメージングを達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

- ① SPECT Imaging of Mice with $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -Radiopharmaceuticals Obtained from ^{99}Mo Produced by $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ and Fission of ^{235}U , K. Hashimoto, Y. Nagai et al., J. Phys. Soc. Jpn. 84 (2015) 043201 (査読有)
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.043202>
- ② New Phenomenon Observed in Thermal Release of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ from Molten $^{100}\text{MoO}_3$, M. Kawabata, Y. Nagai, K. Hashimoto et al., J. Phys. Soc. Jpn. 84 (2015) 023201 (査読有)
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.84.023201>
- ③ High Thermo-Separation Efficiency of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ from Molten $^{100}\text{MoO}_3$ Samples by Repeated Milking Tests, Y. Nagai, M. Kawabata, K. Hashimoto et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014) 083201 (査読有)
DOI:<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.083201>
- ④ First Measurement of the Radionuclide Purity of the Therapeutic Isotope ^{67}Cu Produced by $^{68}\text{Zn}(n,x)$ Reaction Using $^{12}\text{C}(d,n)$ Neutrons: N. Sato, Y. Nagai et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 83 (2014)

- 073201 (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.073201
- ⑤ Generation of Radioisotopes with Accelerator Neutrons by Deuterons: Y. Nagai, K. Hashimoto, Y. Hatsukawa, K. Tsukada et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 82, 064201 (2013). (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.064201
- ⑥ New Production Routes for Medical Isotopes ^{64}Cu and ^{67}Cu Using Accelerator Neutrons: T. Kin, Y. Nagai et al., J. Phys. Soc. Jpn. 82, 033201 (2013). (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.033201
- ⑦ Radioactive Tracer ^{132}Cs (TRACs) for Fukushima Nuclear Power Plant Accident: Y. Nagai, H. Makii et al.; J. Phys. Soc. Jpn. 81, 085003 (2012). (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.81.085003
- ⑧ Accumulation of arginine-rich cell-penetrating peptides in tumors and the potential for anticancer drug delivery in vivo, Nakase I, Konishi Y, Ueda M, Saji H, Futaki S, J Control Release. 159(2): 181-8 (2012). (査読有)
- ⑨ ^{64}Cu -DOTA-anti-CTLA-4 mAb enabled PET visualization of CTLA-4 on the T-cell infiltrating tumor tissues, Higashikawa K, Ueda M et al., J Control Release. 159(2): 181 (2012). (査読有)
doi: 10.1371/journal.pone.0109866.
- ⑩ Successful Labeling of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP Using $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Separated from ^{99}Mo Produced by $^{100}\text{Mo}(n, 2n)^{99}\text{Mo}$: Y. Nagai, Y. Hatsukawa et al.: J. Phys. Soc. Jpn. 80 (2011) 083201 (査読有)
DOI:http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.083201
[学会発表] (計 16 件)
- ① 金 政浩他、重陽子加速器中性子源設計に必要な重陽子核データに関する研究、日本原子力学会 2015 年春の年会、2015 年 3 月 20 日～22 日、茨城大学(茨城県日立市)
- ② T. Kawagoe, T. Kin et al., Measurement of neutron yield by foils activation unfolding method for medical radioisotopes production using accelerator neutrons, 2014 Symposium on Nuclear Data, 2014 年 11 月 27 日～28 日、北海道大学(北海道札幌市)
- ③ 吹野佑太、宮本昂明、神野伸一郎、上田真史、榎本秀一. ATCUN モチーフに基づいたイメージング用 ^{64}Cu ペプチドキレターの有用性評価. 第 4 回メタロミクス研究フォーラム. 2014 年 11 月 7 日、武蔵野大学 (東京都西東京市).
- ④ Fujisawa Y., Iida Y., Tumor imaging with ^{64}Cu labeled Hematoporphyrin derivatives in MDA-MB-231 bearing mice, EANM'14 - Annual Congress of the European Association of Nuclear Medicine, 2014 年 10 月 20 日、Gothenburg, Sweden
- ⑤ Radioisotope productions for medical use with accelerator neutrons: F. Minato, Y. Nagai et al. 第 4 回日米合同原子核物理学会(Oct.7-11, 2014 Hawaii, USA.)
- ⑥ Production of ^{64}Cu and ^{67}Cu for radiopharmaceuticals using Zn target irradiated with accelerator neutrons: M. Kawabata, K. Hashimoto, Y. Nagai et al. 第 4 回日米合同原子核物理学会 (Oct.7-11, 2014 Hawaii, USA.)
- ⑦ 金 政浩他、加速器中性子源を用いた $^{58}\text{Ni}(n,p)$ 反応による ^{58}Co の角度微分収量の計測、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、2014 年 9 月 17 日～20 日、北海道大学(北海道札幌市)
- ⑧ 上田真史. がん分子標的治療に資する放射性金属標識抗体. 第 25 回日本微量元素学会. 2014 年 7 月 4 日、岡山大学 (岡山県岡山市)
- ⑨ 加速器中性子による核医学診断治療用 RI 製造、永井泰樹、第 15 回放射線プロセスシンポジウム、2014 年 6 月 17, 18 日、東京大学 (東京都)
- ⑩ Higashikawa K, Watanabe K, Kamino S, Ueda M, Hiromura M, Enomoto S. Evaluation of the usability of ^{64}Cu -labeled antibody probe for imaging cytotoxic T lymphocyte-associated antigen-4 in tumor. 第 24 回金属の関与する生体関連反応シンポジウム. 2014 年 6 月 14 日、京都薬科大学 (京都府京都市)
- ⑪ Medical isotope production using high intensity accelerator neutrons, Y. Nagai, 23rd Int. Conf. on the Appl. Accelerators in Research and Industry (CAARI 2014), (May.25-30, 2014 San Antonio, USA.)
- ⑫ 藤澤豊、峰田麻衣子、中須賀彩、山口藍子、富永英之、樋口徹也、対馬義人、橋本和幸、永井泰樹、飯田靖彦、「ヒト乳腺がん細胞移行マウスにおける ^{64}Cu 標識 Hematoporphyrin 誘導体の腫瘍集積性評価」、薬学会第 134 年会、2014 年 3 月 29 日、熊本大学 (熊本県熊本市)
- ⑬ 吹野佑太、宮本昂明、神野伸一郎、上田真史、榎本秀一. イメージング用 ^{64}Cu キレターとしての ATCUN モチーフの有用性の検討. 日本薬学会第 134 年会. 2014 年 3 月 29 日、熊本大学ほか (熊本県熊本市).
- ⑭ 森岡朝美、東川桂、赤田直輝、渡邊恵子、神野伸一郎、上田真史、廣村信、榎本秀一. 潰瘍性大腸炎のための新規イメージングプローブ開発に向けた炎症関連分子の探索. 日本薬学会第 134 年会. 2014 年 3 月 28 日、熊本大学ほか (熊本県熊本市)
- ⑮ Higashikawa K, Munekane M, Watanabe K, Kamino S, Ueda M, Hiromura M, Enomoto S. Development of a ^{64}Cu -labeled antibody probe for visualizing CTLA-4 in the tumor. 4th International Symposium on Metallomics. 2013 年 7 月 10 日. Oviedo, Spain.
- ⑯ 中須賀彩、藤澤豊、峰田麻衣子、山口藍子、

富永英之、樋口徹也、対馬義人、橋本和幸、永井泰樹、飯田靖彦、「DA-MB-231 移入マウスにおける ^{64}Cu 標識ヘマトポルフィリンの腫瘍集積性評価」、第 59 回日本薬学会東海支部大会、2013 年 7 月 6 日、名城大学（愛知県名古屋市）

〔図書〕（計 3 件）

①核医学診断・治療用 RI と新 RI 製造法、永井泰樹、橋本和幸、展望 Isotope News 719 (2014) 7

②小型加速器から得られる中性子による ^{99}Mo 等医療用 RI 生産に向けて、永井泰樹、橋本和幸、日本物理学会誌 69 (2014) 370

③Radionuclide Production, K. Hashimoto and Y. Nagai, Comprehensive Biomedical Physics, (2014) 219 Elsevier Ltd.

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：MoO₃ から ^{99m}Tc を熱分離精製する方法及びその装置

発明者：永井泰樹他 4 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構、株式会社千代田テクノル

種類：特許

番号：特願 2014-264756

出願年月日：2014 年 12 月 26 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 8 件）

①名称：放射性モリブデンの製造方法及び装置

発明者：永井泰樹他 10 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522563 号

出願年月日：2009 年 11 月 27 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

②名称：イットリウム放射性同位体からなる放射性医薬並びにその製造方法及び装置

発明者：永井泰樹他 3 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522562 号

出願年月日：2009 年 9 月 9 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

③名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522564 号

出願年月日：2010 年 1 月 18 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

④名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522565 号

出願年月日：2010 年 1 月 18 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

⑤名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522566 号

出願年月日：2010 年 1 月 18 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

⑥名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522567 号

出願年月日：2010 年 1 月 18 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

⑦名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5522568 号

出願年月日：2010 年 1 月 18 日

取得年月日：2014 年 4 月 18 日

国内外の別：国内

⑧名称：放射性同位元素の製造方法及び装置
発明者：永井泰樹他 9 名

権利者：独立行政法人日本原子力研究開発機構

種類：特許

番号：特許第 5673916 号

出願年月日：2009 年 11 月 9 日

取得年月日：2015 年 1 月 9 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等：<http://jaea-grand.jaea.go.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

永井 泰樹 (NAGAI, Yasuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力エネルギー基盤連携センター・客員研究員

研究者番号：80028240

(2)研究分担者

1)初川 雄一 (Hatsukawa, Yuuichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力エネルギー基盤連携センター・研究主幹

研究者番号：40343917

2)橋本 和幸 (Hashimoto, Kazuyuki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力エネルギー基盤連携センター・研究主幹

研究者番号：80414530

3)塚田 和明 (Tukada, Kazuaki)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究主幹

研究者番号：30343916

4)佐藤 哲也 (Sato, Tetsuya)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・研究員

研究者番号：40370328

5)今野 力 (Konno, Chikara)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究主幹

研究者番号：90354729

6)飯田 靖彦 (Iiida, Yasuhiko)

鈴鹿医療科学大学・薬学部・教授

研究者番号：6025245

7)上田 真史 (Ueda, Masashi)

岡山大学・医歯薬学総合研究科・准教授

研究者番号：40381967

8)金 政浩 (Kin, Tadahiro)

九州大学・総合理工学研究院・助教

研究者番号：80450310

(3)連携研究者

1)原田 秀郎 (Harada, Hideo)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力基礎工学研究センター・研究主席

研究者番号：80421460

2)永目 諭一郎 (Nagame, Yuichiro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 先端基礎研究センター・副センター長

研究者番号：80354885

3)落合 謙太郎 (Ochiai, Kentaro)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門 六ヶ所核融合研究所・研究副主幹

研究者番号：30370373