ỨNG DỤNG NHỰA AG 1-X8 VÀ TEVA ĐỂ XÁC ĐỊNH HÀM LƯỢNG CÁC ĐỒNG VỊ ²³⁹Pu VÀ ²⁴⁰Pu TRONG MÃU NƯỚC BIỂN BẰNG PHƯƠNG PHÁP ICP-MS

Trương Đức Toàn* Nguyễn Giằng, Võ Trần Quang Thái, Đỗ Tâm Nhân, Nguyễn Lê Anh, Nguyễn Việt Đức**

Tóm tắt

Chúng tôi thiết lập quy trình xác định các đồng vị phóng xạ ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu trong mẫu nước biển bằng phương pháp khối phổ plasma cảm ứng (ICP-MS). Mẫu sau khi được thu thập, các đồng vị Pu được tách ra khỏi nước biển bằng cách đồng kết tủa với MnO_2 . Plutoni được tách ra khỏi nền Mn bằng cách đồng kết tủa với $Fe(OH)_3$ tại pH bằng 6. Sau đó, plutoni được tách ra khỏi matrix các nguyên tố nhiễu bằng nhựa AG 1-X8 và TEVA, các đồng vị plutoni được giải hấp khỏi cột nhựa AG 1-X8 bằng dung dịch HCl 8 M -NH₄I 7,5% và được tách khỏi cột nhựa TEVA bằng dung dịch HCl 0,05 M + HF 0,01 M. Dung dịch cuối cùng được xác định bằng ICP-MS, với hiệu suất thu hồi hóa học khoảng 80% khi sử dụng đồng vị ²⁴²Pu đánh dấu trên 20 lít nước biển. Giới hạn phát hiện đạt được đối với các đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu là 50 fg mL⁻¹.

Từ khóa: ICP-MS; ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu; nhựa AG 1-X8 và TEVA; mẫu nước biển

Abstract

Application of AG 1-X8 and TEVA resins for determining of ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu in seawater samples by ICP-MS

We established procedure for determining ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu radioactive isotopes in seawater samples by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method. After suitable pre-treatment of the samples, the plutonium nuclides in solution were coprecipitated with MnO_2 and separated from the large amount of Mn by performing a second precipitation of $Fe(OH)_3$ at $pH \approx 6$. After that, plutonium separated from interfering elements by using of AG 1-X8 and TEVA resins. Plutonium isotopes were eluted with HCl 8 $M-NH_4I$ 7.5% from AG 1-X8 resin, converted into nitrate form and separated from TEVA resin with HCl 0.05 M + HF 0.01 M. The final solution was measured by ICP-MS (Perkin Elmer 300X), with a mean chemical yield of 80% determined with ²⁴²Pu as a tracer when analyzing 20 liters seawater sample. The detection limits were estimated to be 50 fg mL⁻¹ for ²³⁹Pu and ²⁴⁰Pu.

Key words: *ICP-MS*; ²³⁹*Pu and* ²⁴⁰*Pu*; *AG 1-X8 and TEVA resins; seawater samples*

1.Giới thiệu

Plutoni là kim loại nặng độc có tính phóng xạ, gây ô nhiễm môi trường và có độc tính cao với con người cả về mặt hóa học lẫn phóng xạ. Plutoni khi xâm nhập vào cơ thể, vào hệ thống máu và được vận chuyển khắp cơ thể vào gan, thận và các cấu trúc hữu cơ của cơ thể, plutoni rất khó bị đào thải và được tích lũy dần trong cơ thể, chu trình bán rã sinh học tự nhiên của Pu từ 40-100 năm [1,2]. Plutoni tồn tại trong môi trường hiện nay được

^{*}ThS, Viện Nghiên cứu Hạt nhân

^{**}ThS, Viện Nghiên cứu Hạt nhân

phát tán từ các vụ thử vụ khí hạt nhân trên bề mặt khí quyển, từ các chu trình nhiên liệu hạt nhân và các sự cố nhà máy điện hạt nhân ở nhà máy Chernobyl, Liên Xô năm 1986 [3] và Fukushima Dai-ichi, Nhật Bản năm 2011. Nguồn phát thải plutoni chính là từ các vụ thử vũ khí hạt nhân trong giai đoạn 1954 - 1962, với tổng lượng rơi lắng toàn cầu của các đồng vị Pu khoảng 0,33 PBq ²³⁸Pu, 7,8 PBq ²³⁹Pu, 5,2 PBq ²⁴⁰Pu và 170 PBq ²⁴¹Pu. [3,4].

Ở Việt Nam, tại khu vực sát biên giới phía Bắc có ba nhà máy điện hạt nhân của Trung Quốc vừa đi vào vận hành thương mại. Khi các lò phản ứng hạt nhân hoạt động, một lượng lớn các đồng vị phóng xạ được hình thành, bao gồm các đồng vị như ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Po, ²³⁹Pu, ²³²Th, ²³³U, ²⁴¹Am, ²³⁷Np, ... các đồng vị phóng xạ này nếu bị rò rỉ hoặc phát tán ra bên ngoài sẽ cực kỳ nguy hiểm đến môi trường sống.

Ở nước ta, hiện nay plutoni được xác định chủ yếu bằng phương pháp phổ a. Tuy nhiên, phương pháp này có các hạn chế sau: Cần lượng mẫu lớn, do đó, thời gian chuẩn bị mẫu lâu, thời gian đo kéo dài và chỉ xác định được hàm lượng tổng của plutoni. Phương pháp ICP-MS kết hợp với kỹ thuật chiết pha rắn hoàn toàn khắc phục được những nhược điểm nêu trên, là một trong những phương pháp ưu việt cho độ nhạy cao, thời gian đo được rút ngắn, có thể xác định được đồng thời các đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu [5,6]. Chúng tôi sử dụng hai chất chiết chính là nhựa AG 1-X8 và TEVA, mẫu sau khi được xử lý, plutoni được hấp thụ lên cột, sau đó các đồng vị của plutoni sẽ được rửa giải bằng các dung dịch chiết phù hợp.

Khi xác định các đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu trong nước biển cũng như trong các đối tượng môi trường khác bằng phương pháp ICP-MS thường gặp các trở ngại sau: Các yếu tố gây nhiễu do đặc trưng của thiết bị cũng như các vật liệu để vận hành thiết bị, các nhiễu do matrix của mẫu và hàm lượng các đồng vị cực kỳ nhỏ (10⁻¹²-10⁻¹⁵g mL⁻¹) [7]. Do đó, việc nghiên cứu để tối ưu hóa điều kiện thiết bị cũng như tách các đồng vị này ra khỏi matrix mẫu và làm giàu chúng là hết sức cần thiết. Mặt khác, các đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu rất quan trọng và hữu ích trong việc điều tra môi trường và nhận diện nguồn gốc phóng xạ [7,8]. Chính vì vậy, việc phát triển phương pháp xác định các đồng vị này trong các mẫu nước biển sẽ góp phần quan trọng trong công tác quan trắc môi trường phóng xạ biển ở nước ta.

2. Thực nghiệm

2.1. Hóa chất, thiết bị và dụng cụ

2.1.1. Hóa chất

- Hóa chất được sử dụng cho quy trình tách Pu: nước siêu tinh khiết (miliQ) 18 M Ω , axit clohydric (HCl, 37 %), axit nitric (HNO₃, 65%), axit flohidric (HF, 48%), natri nitrat (NaNO₂), amoni iodid (NH₄I, 99%), hydroxylamin hydrochlorit (NH₂OH.HCl), mangan clorit (MnCl₂), FeCl₂, NaOH,... được mua từ Merck, Đức.

- Nhựa AG 1-X8 (100-200 mesh, Biorad), được nhồi vào cột (10x100 mm) và được hoạt hóa bằng HNO₃ 8 M. Nhựa TEVA (100-150 μ m, Eichrom), được nhồi vào cột (8x40 mm) và được hoạt hóa bằng HNO₃ 2 M.

- Dung dịch chuẩn các đồng vị ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu và ²⁴²Pu.

2.1.2. Thiết bị và dụng cụ

+ Máy ICP-MS NexION 300X PerkinElmer, phần mềm điều khiển và xử lý phổ NexION 300X version 1.5.

+ Cân phân tích Sartorius, độ chính xác 10^{-5} g; Bếp điện, máy ly tâm; Micropipet 20 μ L (2÷20 μ L) và 1000 μ L (80÷1000 μ L); Bình định mức các loại, dụng cụ thủy tinh các loại, giấy lọc Φ 45 μ m; Chén teflon, các bình chứa miệng nhỏ bằng FEP (Polyetylen florua) dung tích 10-50 mL.

3.2. Cách tiến hành

3.2.1. Chuẩn bị mẫu thử

Mẫu nước biển được thu thập và axít hóa, sau khi được bổ sung chất đánh dấu ²⁴²Pu (đánh giá độ thu hồi plutoni). Plutoni được tách khỏi nền matrix mẫu bằng hai bước đồng kết tủa với MnO₂ và Fe(OH)₃, sau đó plutoni được tách trên hai cột nhựa trao đổi AG 1-X8 và TEVA, nền dung dịch mẫu cuối trong dung dịch HNO₃ 1 M. Mô tả chi tiết của quá trình chuẩn bị mẫu được trình bày trong hình 1.

3.2.2. Tách và làm giàu Pu bằng cách đồng kết tủa với MnO₂.

Mẫu nước biển được thu thập và axit hóa, bổ sung 100 pg đồng vị ²⁴²Pu và trộn đều, thêm vào 75 mL dung dịch KMnO₄ 0,5 M, khuấy đều, dung dịch được điều chỉnh pH $\approx 8 - 9$ bằng NaOH 2 M; Sau đó, thêm vào 150 mL dung dịch MnCl₂ 0,5 mol L⁻¹, Pu được đồng kết tủa với MnO₂. Sau khi để lắng qua đêm tách và lọc kết tủa bằng giấy lọc 0,45 µm (kết tủa A).



Hình 1: Quy trình xác định ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu trong mẫu nước biển bằng nhựa AG 1-X8, TEVA và ICP-MS

3.2.3. Tách Pu bằng cách đồng kết tủa với Fe(OH)₃.

Kết tủa A được hòa tan bằng 15 mL dung dịch HCl 2 mol L^{-1} , thêm vào 20 mL NH₂OH.HCl. 50 mg FeCl₃ được cho vào dung dịch A, trộn đều sau đó cho vào 5 mL

NH₂OH.HCl để khử Fe (III) về Fe (II) và Pu (IV) về Pu (III), dung dịch được axit hóa bằng HNO₃ về pH \approx 2.

1 g NaNO₂ được thêm vào mẫu để oxy hóa NH₂OH.HCl dư và oxy hóa Fe (II) và Pu (III) lên Fe (III) và Pu (IV) tương ứng, vì Pu (IV) được tách tốt trên nhựa trao đổi anion. Để đồng kết tủa Pu với Fe(OH)₃, dung dịch được đều chỉnh pH $\approx 8 - 9$ bằng NH₄OH và đun nóng khoảng 60-70 ⁰C. Mẫu được chuyển vào ống li tâm và ly tâm 15 phút, thải bỏ phần dụng dịch, kết tủa được hòa tan bằng HCl đặc và được làm bay hơi đến khô. Hòa tan kết tủa bằng 20 mL dung HNO₃ 8 M, thêm vào 0,5 g NaNO₂, đun nóng để oxy hóa Pu (III) thành Pu (IV). Dung dịch được làm lạnh đến nhiệt độ phòng và được lọc qua giấy lọc. Cuối cùng, ta thu được khoảng 20 mL dung dịch HNO₃ 8M chứa Fe (III) và Pu (IV), được sử dụng để tách Pu (IV) trong các bước tiếp theo.

3.2.4. Chuẩn bị cột nhựa trao đổi ion và tách Pu.

Nhựa trao đổi anion AG 1-X8 được ngâm trong nước 24 giờ trước khi sử dụng, nhồi 10 mL nhựa vào cột tách có chiều dài 10 cm, Φ =1cm. Nhựa được sử dụng ở dạng chlorit, do đó, phải chuyển từ dạng chlorit sang dạng nitrat bằng 20 mL dung dịch HNO₃ 8M.

Dung dịch chứa Pu (IV) được cho chạy qua cột với tốc độ 1 mL/phút, sau đó cột được rửa lần lượt bằng 30 mL dung dịch HNO₃ 8 M và 30 mL dung dịch HCl 10 M để loại bỏ các nguyên tố không hấp phụ và hấp phụ yếu trên cột (Th, Pb, Am,...). Tiếp đến ta rửa giải Pu bằng 50 mL dung dịch HCl+NH₄I (HCl đặc và NH₄I 25% được pha với tỉ lệ 7:3), ta thu được dung dịch Pu (A).

Dung dịch Pu (A) được cô cạn, hòa tan bằng 2mL dung dịch HNO₃ 1 M, cô cạn lần nữa. Sau đó, hòa tan mẫu bằng 10 mL dung dịch HNO₃ 1 M, thêm 0,2 g NaNO₂, đun nóng, thêm 10 mL dung dịch HNO₃ 5 M, để nguội ở nhiệt độ phòng để tách Pu ở giai đoạn tiếp theo.

Dung dịch chứa Pu (IV) được cho chạy qua cột nhựa TEVA 2 mL với tốc độ 1 mL/phút, sau đó cột được rửa với 20 mL dung dịch HNO₃ 1 M, tiếp đó là 20 mL dung dịch HCl 6 M. Pu được rửa giải bằng 25 mL dung dịch HCl 0,05 M+HF 0,01 M. Dung dịch này được cô cạn, thêm 1mL HNO₃ đặc, cô cạn lần nữa, hòa tan bằng 1-2 mL HNO₃ 1 M. Dung dịch này dùng để xác định trên ICP-MS.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Ảnh hưởng của nền U khi xác định các đồng vị Pu bằng ICP-MS.

Tín hiệu nền của thiết bị được xác định trên nền mẫu trắng (HNO₃ 0,5 M) bằng điều kiện vận hành tối ưu, số đếm của nền trong khoảng số khối từ 239 tới 240 luôn nhỏ hơn 1,0 cps.

Độ chính xác của việc xác định ²³⁹Pu có thể bị ảnh hưởng bởi phổ nhiễu gây ra bởi tín hiệu ²³⁸UH⁺. Bên cạnh đó, khi tách plutoni từ matrix mẫu, một phần U sẽ còn lại trong dung dịch cuối cùng bởi vì ta không thể tách hoàn toàn hoặc U cũng có thể bị nhiễm bẩn trong các giai đoạn tách [9]. Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các tín hiệu nhiễu, một dải nồng độ U (0,1 ppb - 50 ppb) được sử dụng để xác định phổ nhiễu gây ra bởi tín hiệu ²³⁸U¹H⁺ và ²³⁸U¹H₂⁺ tại số khối 239,05 và 240,05 amu của hai đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu (Bảng 1).

U	²³⁸ U	²³⁸ U ¹ H ⁺	²³⁸ U ¹ H ₂ ⁺
(ppb)	(cps)	(cps)	(cps)
0,0	15,0	0,5	0,5

Bảng 1: Mức độ hình thành $^{238}U^{1}H^{+}$ và $^{238}U^{1}H_{2}^{+}$

0,05	2393,0	0,3	0,5
0,1	4452,3	0,3	0,5
0,2	8419,9	0,5	0,3
0,5	20487,2	2,3	0,3
1,0	41084,4	4,0	0,0
2,0	82699,4	8,2	0,5
5,0	205300,9	22,0	0,2
10,0	402500,8	39,0	0,2
20,0	806832,3	79,6	1,0
50,0	2036604,0	220,9	0,6

Khi có mặt U ở nồng độ từ 0,05 ppb tới 0,2 ppb thì cường độ vạch phổ của 238 U¹H⁺ và 238 U¹H₂⁺ có giá trị nhỏ hơn 1 cps. Tuy nhiên, khi nồng độ U tăng dần từ 0,5 ppb tới 50 ppb thì cường độ vạch phổ của 238 U¹H₂⁺ vẫn nhỏ hơn 1 cps, trong khi vạch phổ 238 U¹H⁺ tăng theo nồng độ U từ 2,3 cps tới 221 cps. Do đó, khi có mặt U với hàm lượng lớn hơn 0,5 ppb, kết quả phân tích đồng vị 239 Pu

bị ảnh hưởng, ảnh hưởng này tỉ lệ thuận với hàm lượng U có trong mẫu, trong khoảng nồng độ U từ 0,5 tới 50 ppb mức độ đóng góp 238 U¹H⁺/ 238 U bằng khoảng 1,1.10⁻⁴. Tuy nhiên, khi sử dụng nhựa AG 1-X8 và TEVA để tách các đồng vị Pu, U hiện diện trong dung dịch cuối khi xác định bằng ICP-MS có nồng độ luôn < 0,05 ppb nên không ảnh hưởng đến kết quả phân tích đồng vị 239 Pu.

4.2. Tách Pu ra khỏi matrix bằng nhựa AG 1-X8.

Trên cơ sở hằng số phân bố K' của các actinit trong môi trường axit HCl và HNO₃ trên nhựa AG 1-X8, cho thấy rằng, các ion plutoni (IV) và thori (IV) hấp thụ mạnh trên nhựa trong môi trường HNO₃ từ 6 M đến 10 M [10,12]. Trong khi đó, trong dải nồng độ này thì ion như Ca, Mg, Na, Fe,... không hấp thụ trên nhựa và trong môi trường HCl 4-10 M chúng ta có thể rửa giải Th (VI), trong khi Pu (IV) vẫn hấp thụ tốt trên cột. Do đó, ta có thể sử dụng nồng độ HNO₃ và HCl này để loại bỏ matrix nền, đặc biệt là nền urani, thori và cuối cùng ta có thể rửa giải Pu (III hoặc V) bằng dung dịch HCl trong khi U vẫn hấp thụ tốt trên cột.



Hình 2a và 2b: Loại bỏ matrix và tách plutoni trên cột nhựa AG 1-X8 10 mL

Khi sử dụng 30 mL dung dịch $HNO_3 8 M$ để loại bỏ matrix mẫu, ở 20 mL đầu, urani cũng bị rửa giải 1 phần (khoảng 5%), trong khi plutoni vẫn hấp thụ tốt trên cột và hầu như không rửa giải theo matrix. Khi sử dụng tiếp 30 mL dung dịch dịch HCl 10 M để loại bỏ matrix mẫu, thori được rửa giải gần như hoàn toàn, trong khi plutoni vẫn hấp thu tốt trên cột và hầu như không rửa giải theo matrix. Khi giải hấp Pu bằng 50 mL hỗn hợp HCl 8 M và NH₄I 7,5%, ở 0-20 mL đầu pu được rửa giải với hiệu suất đạt khoảng 60% và đạt đỉnh khoảng 35% tại 16-20 mL. Trong 30 mL tiếp theo đường cong rửa giải Pu có xu hướng đối xứng so với khi sử dụng hỗn hợp HCl khác.

4.3. Tách Pu ra khỏi matrix bằng nhựa TEVA.

Trên cơ sở hằng số phân bố K' của các actinit trong môi trường axit HCl và HNO₃ trên nhựa TEVA, cho thấy rằng, các ion Pu (VI), Np (VI) và Th (IV) hấp thụ mạnh trên nhựa trong môi trường HNO₃ từ 2 M đến 4 M [11,12]. Trong khi đó, trong dải nồng độ này thì ion urani (VI) không hấp thụ trên nhựa và trong môi trường HCl 4-6 M chúng ta có thể rửa giải Th(VI), trong khi Pu (VI) vẫn hấp thụ tốt trên cột. Do đó, ta có thể sử dụng nồng độ HNO₃ và HCl này để loại bỏ matrix nền, đặc biệt là nền urani, thori và cuối cùng ta có thể giải hấp plutoni bằng dung dịch HCl <1 M.



Hình 3a và 3b: Loại bỏ matrix và tách plutoni trên cột nhựa TEVA 2 mL.

Khi sử dụng dung dịch HNO₃ 2 M để loại bỏ matrix, ở 1 mL dung dịch đầu, hầu hết các nguyên tố matrix và urani được rửa giải khoảng 90%, với 5 mL gần như hoàn toàn, trong khi Hg chỉ giải hấp được khoảng 5% và Th vẫn hấp thu tốt trên cột. Khi sử dụng dung dịch HCl 6 M để loại bỏ matrix, ở 5 mL dung dịch đầu, ion thori được rửa giải gần như hoàn toàn, trong khi plutoni vẫn hấp thu tốt trên cột. Sau đó, sử dụng dung dịch 0,05 M HCl + 0,01 M HF để rửa giải plutoni, ở 3 mL dung dịch đầu, ion plutoni được rửa giải khoảng 97% và ở 5 mL thì plutoni được rửa giải gần như hoàn toàn. Do đó, bằng cách sử dụng dung dịch 0,05 M HCl + 0,01 M HF ta có thể rửa giải gần như hoàn toàn plutoni ra khỏi cột. Đường cong rửa giải đối xứng và thể tích dung dịch giảm 3 mL so với khi sử dụng dung dịch 0,5 M HCl + 0,01 M HF để rửa giải.

4.4. Mẫu nền trắng và giới hạn phát hiện

Mẫu nền trắng được sử dụng là 20 lít nước deion 18,5 MΩ, được bổ sung các thành phần chính của nước biển như Na, Ca, Mg, K, ... và hàm lượng U khoảng 3 ppb. Mẫu được tiến hành tách như hình 1, độ nhạy tín hiệu xác định của đồng vị ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu là nhỏ hơn 1cps. Kết quả của ²³⁹Pu và ²⁴⁰Pu được tính toán bằng giá trị của sự khác biệt số khối thêm vào từ kết quả xác định đường chuẩn. Giới hạn phát hiện của thiết bị là 50 fg mL⁻¹ khi thể tích mẫu cần thiết để xác định là 1 mL. Khi sử dụng 20 lít nước biển để tách và đưa về 1 mL dung dịch cuối dùng để xác định bằng ICP-MS thì giới hạn phát hiện của phương pháp có thể đạt 2,5 fg L⁻¹ nước biển.

4.5. Hiệu suất thu hồi plutoni trong mẫu nước biển

Hiệu suất thủ hồi các đồng vị 242 Pu, 239 Pu, 240 Pu trong mẫu nước biển bằng thực nghiệm khoảng 80 ±7 % (n=3). Hiệu suất thu hồi đồng vị 239 Pu (81,8 %) thì cao hơn hiệu suất thu hồi hai đồng vị 240 Pu (80,4 %) và 242 Pu (80,8 %), trong khi độ lặp lại thì lớn hơn tương ứng là 7,14 %, 6,48 % và 5,42 %, điều này có thể giải thích do lượng mẫu thêm vào của đồng vị 239 Pu là khá nhỏ 0,203 pg so với các đồng vị khác, nên kết quả phân tích một phần nào đó bị ảnh hưởng bởi matrix mẫu.

STT	Đồng vị	Số lần phân tích (n)	Giá trị thêm vào (pg)	Giá trị thực nghiệm trung bình (pg)	Hiệu suất thu hồi (%)	Độ lặp lại (%)
1	²³⁹ Pu	3	0,203	0,166	81,8	7,14
2	²⁴⁰ Pu	3	0,843	0,678	80,4	6,48
3	²⁴² Pu	3	5028	4063	80,8	5,42

Bảng 2. Kết quả phân tích mẫu thêm chuẩn trên mẫu nước biển.

5. Kết luận

ICP-MS là một thiết bị với độ nhạy cao và nền cực kỳ thấp, là công cụ mạnh để xác định nhanh hàm lượng siêu vết của plutoni trong các mẫu môi trường. Bằng việc kết hợp hai loại nhựa AG 1-X8 và TEVA để tách plutoni ra khỏi nền nước biển, hàm lượng U trong dung dịch cuối nhỏ hơn 0,05 ppb, do đó không ảnh hưởng đến quá trình xác định đồng vị ²³⁹Pu.

Giới hạn phát hiện của thiết bị cho các đồng vị ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu là 50 fg mL⁻¹, hiệu suất thu hồi hóa học của phương pháp là 80 \pm 7 %. Khi sử dụng 20 lít nước biển để tách plutoni thì giới hạn phát hiện của phương pháp có thể đạt 2,5 fg L⁻¹ nước biển.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Coughtrey PJ, Jackson D, Jones CH, Kane P, Thorne MC (1984), Radionuclide distribution and transport in terrestrial and aquatic ecosystems—a critical review of data. Rotterdam, Balkema.
- [2] ICRP (1972), The metabolism of compounds of plutonium and other actinides. In: Publication 19. Oxford: Pergamon Press.
- [3] Dobry TJ Jr (1980), Transuranic elements in space nuclear power system. In: Hanson WC, ed., Transuranic elements in the environment. US Department of Energy, DOEE/TIC-386.
- [4] Bojanowski R, Pietruszewski A (1990), Plutonium in air of Warsaw after Chernobyl accident. In: International Symposium on Post-Chernobyl Environmental Radioactivity Studies in East European Countries, 1990. Kazimierz, Poland, September, pages 17–19.
- [5] Bu W, Zheng J, Guo Q, Aono T, Tagami K, Uchida S, Tazoe H, Yamada M (2014), Ultra-trace plutonium determination in small volume seawater by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry with application to Fukushima seawater samples. J Chromatography A 1337, pages 171–178
- [6] Zheng J, Yamada M (2006), Inductively coupled plasma-sector field mass spectrometry with a high-efficiency sample introduction system for the determination of Pu isotopes in settling particles at femtogram levels. Talanta 69, pages 1246–1253
- [7] Wenting Bu^{a, b}, Jian Zheng^{b,,,}, Qiuju Guo^{a,,,}, Tatsuo Aono^c, Keiko Tagami^b, Shigeo Uchida^b, Hirofumi Tazoe^d, Masatoshi Yamada (2014), Ultra-trace plutonium determination in small volume seawater by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry with application to Fukushima seawater samples. "Journal of Chromatography A" Volume 1337, 11 April, pages 171–178.

- [8] Liguo Cao, Wenting Bu, Jian Zheng, Shaoming Pan, Zhongtang Wang, Shigeo Uchida (2016), Plutonium determination in seawater by inductively coupled plasma mass spectrometry. "Talanta", Volume 151, 1 May, pages 30-41.
- [9] Pointurier, F., Hémet, P., Hubert, A (2008). Assessment of plutonium measurement in the femtogram range by ICP-MS; correction from interfering polyatomic species. J. Anal. At. Spectrom. 23(1), pages 94–102.
- [10] Lindahl, P., Keith-Roach, M., Worsfold, P., Choi, M. S., Shin, H. S., Lee, S. H (2010), Ultra-trace determination of plutonium in marine samples using multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry. Anal. Chim. Acta. 671(1), pages 61–69.
- [11] Qiao, J., Hou, X., Miró, M., Roos, P (2009), Determination of plutonium isotopes in waters and environmental solids: A review. Anal. Chim. Acta. 652(1), pages 66–84.
- [12] Chen, Q., Dahlgaard, H., Nielsen, S. P., Aarkrog, A (2002). ²⁴²Pu as tracer for simultaneous determination of ²³⁷Np and ^{239,240}Pu in environmental samples. J. Radioanal. Nucl. Chem. 253(3), pages 451–458.