

ウラン加速における放射線管理

上 蓑 義朋*・坂本 久雄

Radiation Safety for Uranium Acceleration

Yoshitomo UWAMINO* and Hisao SAKAMOTO

Abstract

In March 2007 the ^{238}U beam was accelerated up to 345 MeV/u at RIBF. Handling of U at the ion source involves some risks of surface contamination and internal exposure and the accelerator components are becoming contaminated with alpha emitters. The facility must meet the request of the laws and the actual safety, and the work must be properly controlled.

1. はじめに

理研のリニアック (RILAC), リングサイクロトロン (RRC) は, ウランまでのあらゆる元素を加速できる能力があるため, 一部の研究者からは早い時期からウランビームの要望があった. しかし日本でウランを加速する場合は法的に厳しい規制を受けること, イオン源で α 核種を扱うことの困難さから, 放射線管理を担当する側としては安易に進めることはできなかった.

しかし RIBF 計画が本格的に始動したことから, ウラン加速は急速に現実の問題となってきた. そこですでにウランを加速していたドイツ GSI とフランス GANIL を 1997 年 5 月に訪問し, 安全管理の実態を見聞した. 両施設とも, イオン源部品の洗浄やウランの加工を行うイオン源準備室での安全対策は予想以上にしっかりしていた. しかしいったん加速した後は, 特別な放射線管理が行われていなかったが, これはウランの比放射能 (質量あたりの放射能) が小さいことから, 科学的には合理的であろう. しかし日本では法整備が遅れており, 固体物質についてはいくら濃度が低くても管理不要とはできないため, ビームで照射された機器の取り扱いが問題となる. また我々が知りたかった, イオン源引き出し直後の極低エネルギービームで蓄積したウランによる汚染の可能性などには留意されておらず, 知見を得ることができなかった.

この訪問で得られた知識と国内の情勢などから, 理

研でのウラン加速について以下の方針を決めた.

- 1) イオン源室と準備室は非密封 RI の作業室と同等の設備とする (理研でいう第 1 種管理区域). すなわち排気・排水設備を設け, 床は除染がしやすい滑らかな塗装をし, 汚染検査室から出入りする. 準備室にはフードを設ける.
- 2) イオン源から引き出された後は, ウランが付着しても汚染を生じないと予想されるので, 内部被ばくの恐れのない, 第 2 種管理区域に相当する設備とする. ただしリニアックの照射室および RRC 室などは元来非密封 RI の作業室となっているため, リニアックの加速器室だけが第 2 種管理区域となる.

以上の方針に従って設備の改造を行うとともに, 法令に則った許可申請を行った. 2005 年 10 月にイオン源からのウランビーム引き出し, 2006 年 2 月には RRC での加速を開始した. そしてついに 2007 年 3 月には最終段の加速器である超伝導リングサイクロトロン (SRC) によって核子あたり 345 MeV のウランビームを取り出すことに成功した.

以下に理研 RIBF で行っているウラン加速の安全管理について紹介する.

2. 法的整備

現在理研が行っているウランを用いた研究は, 電子顕微鏡観察のための染色剤, 照射実験のターゲットとしての使用, およびウラン加速である. 使用している

* 独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・安全業務グループ
(E-mail: uwamino@riken.jp)

のは天然ウランおよび劣化ウランだけであり、年間使用量は事業所全体で 300 g に満たない。しかし保有するウランは、過去の研究の経緯から天然ウランや劣化ウランが約 5 kg、低濃縮ウラン (^{235}U 濃度が 20% 以下) が 300 g 程度ある。

年間使用量 (法的には保有量より大きく設定しなければならない) が 300 g 以下の事業所は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」(炉規法) の許可は不要で、国際規制物資の使用許可を取得するだけでよい。この場合は取り扱いには管理区域などの特別の施設は不要で、国際規制物資としての物質収支を管理すればよく、法律上は特別な安全管理は必要ない。しかしながら理研はすでに相当量のウランを保有することから炉規法の許可施設であるため、安全設備や法令上の変更申請などさまざまな規制がかかることになる。

したがってウランの加速には炉規法と障防法 (放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律) の両方の規制を受ける。ウラン自体の危険性は炉規法の範疇、ウランを加速することによって生じる 2 次放射線の生成や放射化にともなう危険性は障防法の範疇、と切り分けて申請を行うことにした。それぞれの法に基づく変更許可申請を 2004 年 11 月末に行い、約 2 ヶ月後の 2005 年 2 月に両方の使用許可を取得することができた。申請直後に管理区域外で RI の放置が発見されるという事件があったにもかかわらず、このような短期間で許可を得ることができたのは、文部科学省の障防法に関する担当官が炉規法の規制の経験者であったこと、炉規法に関する担当官が加速器建設の経験者であったことから、我々の考えが容易に理解されたという幸運のおかげであった。

3. ウランの特徴

精製した直後の 1 g の天然ウランには、 ^{238}U と ^{234}U がそれぞれ 1.24×10^4 Bq、 ^{235}U が 5.68×10^2 Bq 含まれている。ウランは図 1 のように壊変するため、精製後数ヶ月以上経過すると、表 1 に示す組成になる。すなわち、

- 1) ^{238}U だけの比放射能は 1.24×10^4 Bq/g である。
- 2) 精製してウランだけを取り出した直後は、 α 線でしか汚染を検知できない。
- 3) ^{238}U でも 1 ヶ月以上経てば β 線でも汚染を検知できるようになる。

^{238}U を体内摂取した場合の線量¹⁾は、吸入では $5.7 \mu\text{Sv}/\text{Bq}$ 、経口では $0.044 \mu\text{Sv}/\text{Bq}$ であり、年被ばく限度 (20 mSv とする) に相当するのは、吸入では

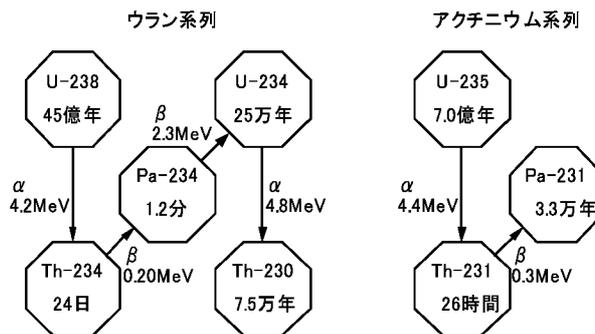


図 1 ^{238}U , ^{235}U の壊変系列

表 1 精製後数ヶ月程度経過した天然ウランの組成

| 同位体 | $\text{natU}-1 \text{ g}$ あたりの放射能 | 主な放射線 |
|-------------------|-----------------------------------|------------------|
| ^{234}U | 1.24×10^4 Bq | α 4.8 MeV |
| ^{235}U | 5.68×10^2 Bq | α 4.4 MeV |
| ^{231}Th | 5.68×10^2 Bq | β 0.3 MeV |
| ^{238}U | 1.24×10^4 Bq | α 4.5 MeV |
| ^{234}Th | 1.24×10^4 Bq | β 0.2 MeV |
| ^{234}Pa | 1.24×10^4 Bq | β 2.2 MeV |
| 合計 | 5.07×10^4 Bq | |

3.5 kBq (0.28 g)、経口では 450 kBq (36 g) である。しかしウランは放射線毒性よりも化学毒性が強く、体重 60 kg の人の致死量は 0.06 g から 0.12 g とされている。

RILAC および RRC 出口における U のエネルギーはそれぞれ 0.7 MeV/u および 11 MeV/u であり、銅における飛程はおよそ $7.1 \text{ mg}/\text{cm}^2$, $38 \text{ mg}/\text{cm}^2$ である。一方 α 線の飛程は $7.6 \text{ mg}/\text{cm}^2$ であるため、ビームがストップ等にあたって埋め込まれた場合、RILAC 入口までは α 線による検出が可能であるが、それ以降では β 線測定に頼る必要があり、通常の放射化と区別しにくくなる。

4. 安全設備

従来リニアック棟加速器室はイオン源を含めた一室であり、内部被ばくの恐れのない第 2 種管理区域であった。ウラン加速のため、イオン源を囲むように壁、天井を設置し、イオン源室を加速器室から分離した。イオン源室の床と壁は塗装し、イオン源室を内部被ばくの恐れのある第 1 種管理区域、加速器室を第 2 種管理区域とした。イオン源室には HEPA フィルタを内蔵した排気浄化設備を新たに設置した。排気は α ダストモニタにより常時監視している。

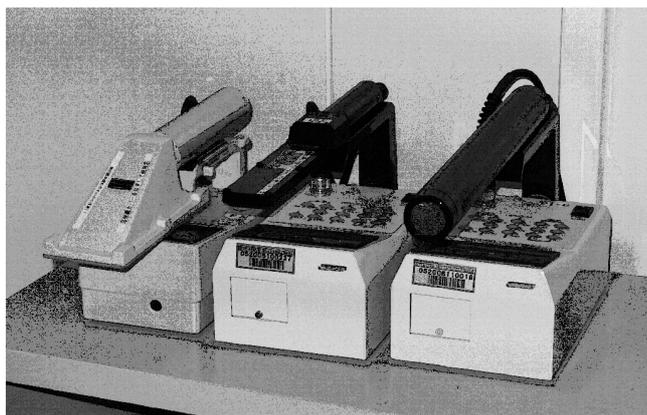


図2 汚染検査室に備えている3種類の α 線サーベイメータ.

イオン源室には汚染検査室を通過して出入りし、 α 線と β 線が同時に測定可能なハンドフットクロスモニタ、手洗い設備を備えてある。加速器部品はさまざまな形状のものがあるため、効率よく物品の汚染検査ができるよう、図2に示す特注のサーベイメータをそろえた。左は通常の市販品であるが、中央はダクト内面などを測定するための細い側面窓型のZnSシンチレーション式サーベイメータ、右はファラデーカップなどの凹んだ底面を測定するための細い端窓型である。

イオン源室への入室者は核燃料物質取扱の教育を受けた者のみとするため、個人被ばく線量計に印刷したバーコードで認識する入退室システムを電気錠と連動させている。扉にはイオン源清掃などの作業後に行う床汚染検査の結果、イオン源の運転状況、ウランの装着状況などを表示し、注意を喚起している。

なおイオン源室を加速器室から分割したことにより、加速器運転中にもイオン源室への入室が可能となった。

5. 安全管理

5.1 イオン源室における管理

当初 ECR イオン源には、 natUF_6 ガスを供給して $^{238}\text{U}^{14+}$ イオンを引き出していたが、現在では金属や酸化物などの固体ウランを挿入して $^{238}\text{U}^{35+}$ イオンを引き出している。 UF_6 を用いた場合は、高温の金属との反応でイオン源部品の表面に緑色の UF_4 が析出し、剥離しやすく汚染を生じやすいという難点があった。しかし金属などを用いた場合は、付着するウラン量は同程度であるが、強固に固着するため取り扱いは比較的容易である。

ECR イオン源は定期的な分解清掃が必要である。



図3 イオン源作業時の内部被ばく防止対策.

その際には床養生を行うなど、汚染の拡大防止策をとるとともに、内部被ばくを防ぐためと衣服の汚染を防止するため、作業者は図3に示すような保護具（タイベックスーツ、ゴム手袋、半面マスク等）を装着している。ただし固体ウランを用いた場合は剥離性のウラン付着が少ないため、保護具は簡素化することが可能かもしれない。

従来イオン源内に付着した不純物はサンドブラスタ等により物理的に削り取ることで除去していたが、ウラン使用開始後は付着物にウランが含まれている可能性があるため、汚染と内部被ばくの防止のため、酸洗浄によって化学的に除去している。

5.2 イオン源室以降の管理

イオン源の引き出し電圧によって金属に埋め込まれたウランは、ろ紙で10回強くこすっても剥離する量は 6×10^{-4} 程度であり、汚染を生じさせる可能性は小さい。しかし RFQ や RILAC 等の加速器真空槽内の保守点検作業時には、身体が真空内面にふれる可能性があるため、イオン源の分解整備時と同様に保護具の装着を行ってから作業を実施することになっている。ただし日常の保守作業時に行われるビーム診断機器の交換時などは、真空内面にふれる可能性はないので、手袋の着用のみで作業を行う。管理区域から真空部品を搬出する際は GM サーベイメータにより汚染検査を行う。

RRC 出口以降のほとんどのビーム診断機器、チャンバー等は、ウラン以外のビームにより放射化してい

る。このため、真空内面にふれる可能性のある作業時には以前から保護具の装着，あるいは手袋の着用を行っており，管理に変化はない。GM サーベイメータを用いた β 線による測定では，ウランが埋め込まれていても放射化と区別できない。そこでビーム損失の多い EDC，後段の fRC 以降の EIC，Stripper 後の Beam Catcher については，検査することなくウラン汚染物として取り扱うこととし，それ以外の物品は，従来通り GM サーベイメータ等により放射化を検査し管理している。

5.3 ウラン汚染物の管理

核燃料物質を含む廃棄物は一般の RI 廃棄物と異なり，国内で処理する制度ができていないため，廃棄物は理研構内で永久保管される。

ウラン汚染の有無は， α 線の検出により判定する方法が，もっとも感度よく調べられるが， α サーベイメータによる直接測定では，ウランから放出される 4.2 MeV の α 線の空気中の飛程が 2.7 cm と短いため，検出面を測定対象面に近づける必要がある。また，スミヤ法によるふき取り検査を行っても，付着の仕方によってはふき取り効率が悪い場合もあり，すべての物を α 線のみにより判断するのが難しい。

そこで我々は，ウラン精製後 1 ヶ月以上たてばウランとウラン系列の β 放出核種である ^{234}Th と ^{234}Pa に放射平衡が成り立つことを利用した判定も併用している。この判定法では廃棄物をステンレス製の缶に密封して 1 ヶ月以上保管し，その後取り出して GM 式 β 線サーベイメーターを用いて汚染の有無を判断している。

6. 結 び

ウラン汚染の付着量や性状，除染についてのノウハウは蓄積しつつあり，イオン源内部以外では剥離性の汚染は見られないこと，真空ポンプのオイルへのウラン混入のないことなどがわかってきた。今後は安全面に配慮しつつ，廃棄物の減量化を図るなどの効率的な管理を行って行きたい。一方国に対しては，放射性廃棄物と一般廃棄物の線引きをするクリアランス制度と，核燃料廃棄物の処理体制の確立が望まれる。

注

- 1) 50 年間の預託実効線量。すなわち摂取後 50 年の間体内に残留するウランおよびその娘，孫等を含めた核種による体内被曝の積算値である。