原子力

しゃへい実験用ウランコンバータ装置

川崎工場設計部原子力課　明比道夫

Uranium-Converter Facility for Shielding Experiments

Michio Akebi
(Atomic Energy Sect., Design Dep't., Kawasaki Works)

Synopsis

The uranium-converter facility, which is the first one for the shielding experiments, has been completed for the First Atomic Power Industry Group Research Laboratory.

This facility was installed in the water tank of TRIGA MARK II Reactor of the Institute for Atomic Energy Rikkyo University and will be used to investigate the radiation shielding characteristics of various materials.

This article describes the construction of the facility and the experimental program to be carried out with this facility.

I. まえがき

このたび，当社は第一原子力産業グループ放射線研究所の注文により，ウランコンバータ装置一式を製作した．この装置は，立教大学・原子力研究所の TRIGA II形原子炉のしゃへい実験用タンク内に設置され，物体の放射線に対するしゃへい効果を実験するためのもので，この種の装置としては，わが国最初のものである。

装置の製作にあたり，核燃料物質であるウランを使用する点，および機構の主要部が水中で動作する点につき，安全性および信頼性の見地から，特に考慮を払った。

II. 概　　要

ウランコンバータは原子炉から出てくる熱中性子をウランにあてて核分裂を起こさせ，そのとき放出される高速中性子およびγ線を物体のしゃへい実験に利用する装置である．一般に放射線に対するしゃへいは，人体の傷害防止の点からきわめて重要であるが，原子炉では放出される中性子および γ 線のエネルギーが広く分布するため，複雑な形状をした物体のしゃへい効果を精度よく計算することが困難な場合が多い．こういうときに，物体に核分裂のときと同じ分布をもつ中性子および γ 線をあてて，物体の前後における放射線の強度を測定すれば，そのしゃへい効果を実験的に求めることができる。

ウランコンバータに用いるウランは，放出される高速中性子および γ 線の強さがある程度大きい方が実験がしやすくまた精度も良いので米国などでは濃縮ウランを用いているが，当社の場合はウランの入手性およびウランコンバータ装置のまわりの放射線防護設備の補強の必要性などの点から天然ウラン板を使用することにした。

原子炉の熱中性子柱から放出される熱中性子束は 100 kW 運転時において $\sim 10^8$ n/cm^{2}sec なので，これによってウラン板が核分裂して放出する高速中性子束は，厚さ 10 mm のウラン板を用いると $\sim 10^7$ n/cm^{2}sec になる．この程度の中性子束があればしゃへい実験は可能である．したがって使用したウラン板の大きさは，熱中性子柱の寸法 600mm×600mm を考慮に入れて，直径 500 mmϕ×厚さ 10mm とした。

ウラン板は購入したものに一切加工を加えず，そのままケースに密封するのであるが，この組立作業は核燃料物質の使用とみなされ，原子炉規制法により核燃料物質の使用許可を必要とした．したがって工場内の組立場所を管理区域として指定し，法規に基づいた種々の措置を講じた。

ウランコンバータをはじめ装置の主要部はタンク内水中に設置されるため，使用材料を耐食アルミニウムおよびステンレス鋼に限定し，アルミニウムには防食を完全にするためにアルマイト処理をほどこした．またウランコンバータの製作にあたって，ウラン板のケースの気密性を完全にするために，あらかじめ試験用のケースについて最適な溶接構造および漏れ検査の方法を確認した。

なお原子炉の上部プラットホームが，タンクの半分ぐらいまで突き出ているため(第1図参照)，炉室に備えて

あるクレーンを用いて実験用試料を直接ウランコンバータのそばにつり込むことができず，このため装置全体がかなり大がかりなものになったのは止むを得ない．本装置によって実験できる試料の最大寸法および重量は，長さ1,000 mm×幅1,200 mm×高さ1,400 mm，2,000 kgである。

III. 構　　造

1. 構　　成

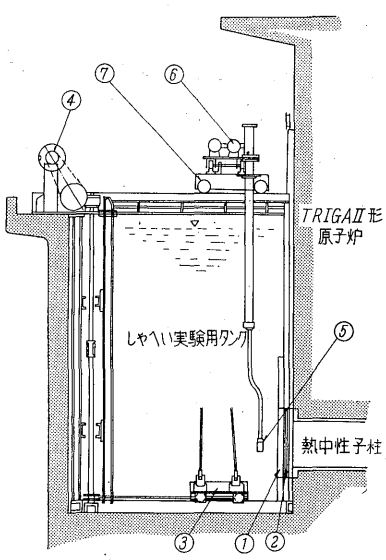
ウランコンバータ装置は，

1) ウランコンバータおよびシャッタ
2) カウンタおよびその駆動装置
3) 試料台およびその移動装置
4) 付属設備

から構成される。

これら装置の配置を第1図によって説明すると，原子炉しゃへい実験用タンク内の熱中性子柱前面にウランコンバータが置かれ，両者の間に手動で上げ下げできるシャッタがそう入される．シャッタはこの装置を使用しないときに，熱中性子柱からの中性子を吸収して，ウランコンバータのウラン板に核分裂を起こさせないようにするためのものである．ウランコンバータも必要に応じて取りはずすことができるようになっている。

タンクの底面には実験用試料をのせる移動台があり，これを動かす移動装置がタンク上部に据付けてある．放射線計測器のプローブをタンク内で上下，左右，前後に動かすための装置が，タンク上部に設置されている。



①ウランコンバータ　⑤カウンタプローブ
②シ ャ ッ タ　⑥カウンタ駆動装置
③試料台，移動台　⑦カウンタ駆動装置
④試料台移動装置　ガータ

第1図　ウランコンバータ装置組立図

Fig. 1. General arrangement of uranium-converter facility

2. ウランコンバータおよびシャッタ

ウランコンバータは第2図に示したように，金属天然ウラン板を耐食アルミニウム（52S）製ケースに，ボラル製絞りおよび熱中性子吸収板とともに封入したものである。

ここでウランコンバータの働きを考えてみると，原子炉のサーマライジングコラムから放出された熱中性子は，分布が平坦でないので，熱中性子をよく吸収するボラル製絞りにより，周囲の非平坦部をカットされ，中央の平坦部のみがウラン板に入射し，核分裂を起こす．その結果，1回の核分裂あたり約 2.5 個の中性子が放出されるが，そのエネルギーは高いものから低いものまで広く分布するので，しゃへい実験に不必要なエネルギーの低い熱中性子を吸収させるボラル板をウラン板の前に置き，なるべく純粋な高速中性子を取り出すようにしてある。

ウラン板はカナダのエルドラド社から輸入したものでその仕様は下記のとおりである。

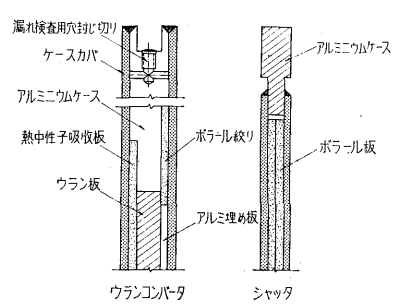
寸法　直径　500mmmφ
　　厚さ　10mm
重量　37.11kg
比重　18.8 以上
純度

Al	B	C	Cr	Fe	H	Mg
≤30	≤0.2	≤150	≤25	≤150	≤10	≤40

Mn	Ni	Si	
≤10	≤30	≤30	ppm

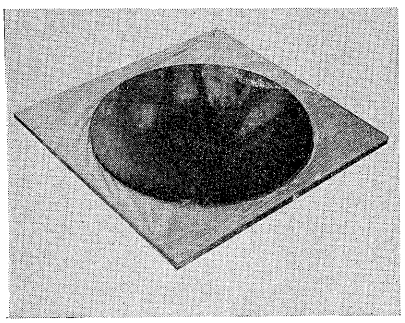
内部欠陥は放射線探傷によって検査し，異常のないことを確認してある。

第3図にウラン板の外観を示す。



第2図　ウランコンバータおよびシャッタ詳細図

Fig. 2. Detail of uranium-converter and shutter



第3図　ウ　ラ　ン　板
Fig. 3.　Uranium disc

ウラン板の表面には輸送中および解梱のときに傷がつくのを防ぐためにはく離性有機材コーティングを施してあり，これはケースに組み立てるときに完全に除去した。

ウランコンバータの製作にあたっては，次の点に特に考慮を払った．すなわち

1)　核燃料物質取扱いに関する保安対策

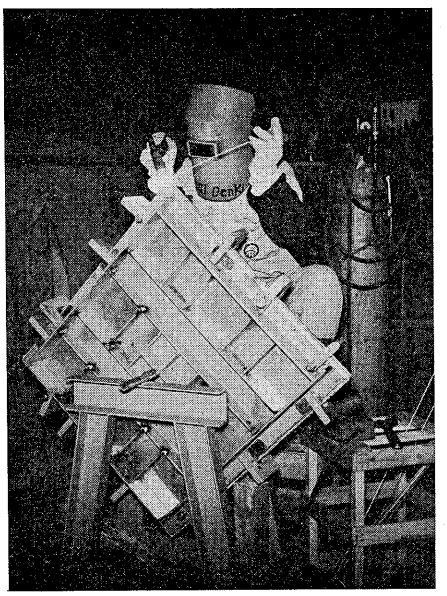
2)　ケースのシール溶接と溶接部の漏れ検査

ウラン板を取扱う際，核燃料物質使用に関する法規にもとづいて，作業者が放射線傷害を受けることがないように保安規定を定め，試作工場の一部を管理区域として他から隔離し，この区域内で組立，溶接作業を行なった．同時に必要な放射線計測を行なって，安全なことを確認した．裸のウラン板の表面における γ 線は約 6 mr/hr であった．はく離したコーティングなどの汚染されていると思われる物品は，まとめて処理施設へ廃棄した。

溶接上問題になるのはひずみの発生で，ケースの周囲を溶接するため，一般にはケースカバがたいこ状にふくらみがちである．これをさけるために，溶接部の形状を第2図のようにひずみの発生がもっとも少ない構造にするとともに，第4図のような拘束治具を用いて溶接した結果，良好な結果を得ることができた。

溶接部には完全な気密性が要求されるので，欠陥の発生を防ぐために溶接部の洗浄を完全にし，また第3図にみるとおり拘束治具を回転式にして，常にもっとも作業のやりやすい下向き姿勢で溶接できるようにした。

漏れ検査はケースに内部と通じる穴をあけておき，ここからケース内部を真空に引き，外部から溶接部に He ガスを吹き付けて漏れを探知する方法をとった．この方法による検出感度は約 10^{-6} lusec である．ただこの方法では，検査後真空引き用の穴を封じ切る必要があり，この部分だけは上記の感度を保証する漏れ検査ができないので，封じ切り部の試験片を多数作成し，封じ切り溶接を行なって上記同様の真空法によって封じ切り部の漏れを検査し，その構造で漏れが皆無であることを確認した。



第4図　ウランコンバータケースの溶接
Fig. 4.　Welding of uranium-converter case

以上の溶接構造および漏れ検査については，ケースの製作に先き立ち，実物と同寸法のモデルにより，実施方法の是否を確認した。

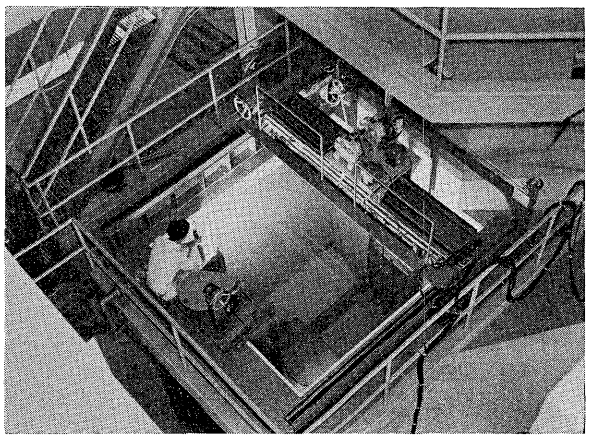
ウラン板を封入後，ケースを所定の寸法に仕上げ，リークテストを行なって，最後に防食のために全体にアルマイト処理を施した。

シャッタはボラル板を耐食アルミニウム（52S）ケースで包んだもので，これもひずみを少なくするような溶接構造をとった．ボラル板は B_4C をアルミニウムの薄板でサンドイッチにしたもので，全体の厚さは 3.2mm である．現在入手可能な寸法は幅が 450 mm しかないので2枚継ぎにしたが，継ぎ目からの中性子の漏れを防ぐために，継ぎ合わせ目を斜めに切って合わせ，ギャップがないようにした．完成後全体をアルマイト処理した。

3.　カウンタおよびその駆動装置

実験に使用する放射線計測器としては γ 線用のものと中性子用のものがあるが，本装置にはそれらのプローブだけが取り付けられる．その内訳は高速中性子用2種類，熱中性子用および γ 線用がそれぞれ1種類である．なおこれらの計測器そのものは今回の装置の契約範囲には含まれない。

計測器のプローブをタンクの中で前後，左右，上下に動かすためにその駆動装置がタンク上面のプラットホームに設置されている．すなわち第5図でみるように，タ



第5図 カウンタ駆動装置
Fig. 5. Counter probe driving mechanism

ンクの長手方向に，タンクの両側にレールを敷き，それに前後走行用のガーダをのせ，またガーダにはタンクに対して横（幅）方向に動くようなキャリジがのせてある．キャリジから垂直に下方向に向かってラックを備えたパイプがのび，この先端に計測器のプローブを入れた取付パイプが接続される．これらのパイプはいずれも水密構造となっているので，プローブ自身を水密構造にする必要はない。

プローブの上下，左右，の動きは，遠隔操作できるようになっており，その位置は操作盤に表示される．しかしこの表示は精度が悪いので，精密な位置の測定は装置の見やすいところに取り付けたスケールによって読みとるようにした。

4. 試料台およびその移動装置

これらは最大重量約 2t の実験用試料をタンクにつり込み，水中でウランコンバータに対して所定の位置まで移動させるための装置である。

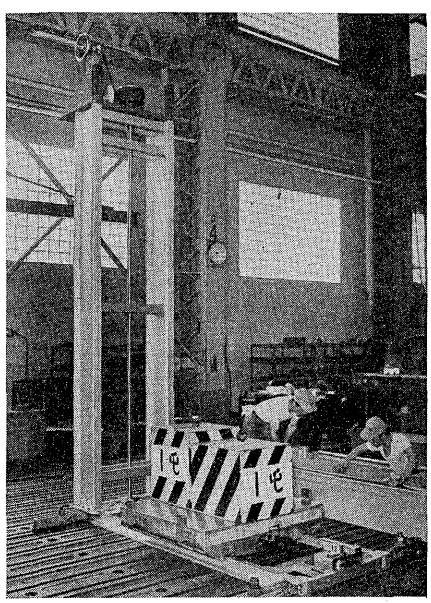
タンクの底にアルミニウム角材の組立構造によるレールを置き，その上に移動台（長さ 1,000 mm×幅 1,200 mm）がのせられる．レールの表面にはステンレス鋼板を張って，レール面の摩耗と損傷に耐えるようにしてある．またレール下面とタンク底面の間にはエポキシ樹脂のスペーサを接着して，タンク内面の水密塗装材料（有機材料）とレールが直接接触して塗装面を損傷するのを防いでいる。

移動台はステンレス鋼板の溶接構造で，車輪の軸受にはニードルベアリングを用いて摩擦を軽減し，また車軸およびニードルにはいずれも特殊表面硬化処理をほどこして重荷重に耐えるようにしてある．移動台にはステンレスのベルトが取り付けられ，これを引張ることによって前後に動かすことができる。

このステンレスベルトはレールの前後，すなわちウランコンバータ側とその反対側に取り付けたスプロケットホイールに掛けられてあり，後部のスプロケットホイールは垂直にのびた軸を介して，タンク上部に固定した移動装置に連結しているので，タンク上部で移動装置のハンドルをまわすことにより移動台を前後に動かすことができる。

しゃへい実験用の試料は炉室床上でステンレス鋼製の試料台（長さ 1,000 mm×幅 1,200 mm）に取り付けられ，炉室に設備されている 3t クレーンによってタンク内につり下される．このとき試料台をタンクの底に置かれてある移動台上の正しい位置にのせるために，つり下げ位置を規制するガイドとなるアルミニウム製のわく組がタンク内に設けてあり，また移動台には2本の位置ぎめピンが突き出していて，試料台が多少ずれた位置につり下げられても，確実に移動台の所定の位置にのせられるようになっている．このように移動台に対する位置の規制を厳密にするのは，実験時には試料が水中にあるため，ウランコンバータとの相対位置を直接測定することが困難なので，移動台の位置を基準にとっているからである。

試料のウランコンバータに対する位置は，タンク上部の移動装置と連動した目盛板によって直読できるようになっているが，これはスプロケットホイールの回転角を減速機を介して読めるようにした位置表示器である．スプロケットホイールに掛かっているステンレスベルト



第6図 試料台，移動台および移動装置
Fig. 6. Sample mounting base, sample carriage and its driving mechanism

第7図　操　作　盤
Fig. 7.　Operation desk

にはスリップが全くないので，位置の読みの誤差は減速機の歯車のバックラッシュ分だけであり，高々 2mm 程度と考えられる。

第6図に工場で荷重テスト中の試料台関係装置を示す。

5. 付 属 設 備

1) 操　作　盤

カウンタプローブの上下，左右動の操作ボタンおよびその位置表示目盛，その他必要な開閉器類は，コンパクトな操作盤（第7図）にまとめられている。

2) 洗　浄　台

タンク内に試料をつり込む前および取出後に，これを洗うために小形ポンプを備えた洗浄台を準備した．試料を洗うのはつり込みのとき付着したごみによってタンクの水（純水）がよごれるのを防ぐためと，取り出す際に放射性物質が付着したまま外部へ持運ばれるのを防ぐためである．洗浄水は原子炉の排水処理系へ廃棄される。

3) そ　の　他

試料を運搬するための2t運搬車，および水中を照明するための水中照明灯（100W×4）を備えている。

IV. ウランコンバータを用いたしゃへい実験

1. 目　　標

次の実験的研究を行なうことにより，従来に比して精度のよいしゃへい設計を可能にすることを目標としている。

1) 原子炉と同様なスペクトルをもった線源（ウランコンバータ）に対する種々のしゃへい材料の特性を調べる。

2) これらしゃへい材料の組み合わせによる多重層のしゃへい効果を求めて計算結果と比較し，より実用的な計算方法を検討する。

3) 複雑な形状のしゃへい体の実物について放射線の減衰効果を測定する。

ところで，ウランコンバータを使用しておこなう実験は次の三つに分けられる。

1) 熱中性子柱の特性試験

2) ウランコンバータの特性試験

3) 各しゃへい実験

以下に各項目についての実験概要を述べる。

2. 熱中性子柱の特性試験

コンバータの線源強度，分布などを正確に知るために昭和 37 年5月に特性試験が行なわれた。

すなわち，しゃへい実験に使用するコンバータには，

(1) 有効半径ができるだけ大きく，

(2) しかもそれから放出される分裂スペクトルをもった放射後の平面分布が一様である

ことがのぞまれる。

そこで本試験を行なうことにより前述の二つの条件が満足されるようなボラル板の絞り半径を決定した。

本特性試験は主に熱中性子束分布に関するもので，インジウムはく，金ぱくを使用して，

(1) 熱中性子化柱出口表面熱中性子束分布，

(2) 水層による熱中性子束の減衰状態，

(3) カドミウム比，

(4) 熱中性子束の絶対測定

などを行なった．

試験結果の内容は，FAPIG 誌 昭和37年10月号（23巻）に記述されているが，ここではその結論のみを記述しておく。

(1) コンバータの有効半径を 20 cm にすればかなり一様な分布の線源がえられる。

(2) カドミウム比は 100 以上で共鳴中性子束は無視できる。

(3) 原子炉出力 100 kW の時，熱中性子化コラム表面中心点における熱中性子束の絶対値は $2.81\times10^{8}\mathrm{n/cm^2\,sec}$ である。

(4) 水層による熱中性子束の減衰はかなりあるがコンバータと熱中性子化柱の間にアルミ板を入れ，水層を 2 cm 程度にしうるので，線源強度の低下を 30% 以

下にとどめうる。

3. ウランコンバータの特性試験

ウランコンバータを設置後，コンバータを使用してしゃへい実験を行なう前に，コンバータから出る中性子およびγ線の線量およびスペクトルを確認し，天然ウランコンバータの特性を明らかにしなければならない．この試験は昭和 38 年2月上旬よりおこなわれる予定であるが，その内容は次のとおりである。

1) 水中におけるバックグランドの測定

原子炉出力が0と100kW の時，ボラルシャッタを閉じた際の水中における熱中性子束およびγ線束を測定する．使用する測定器は，BF_3 カウンタ，電離箱，はくである。

2) 出 力 の 較 正

原子炉出力の変化に伴う水中の熱中性子束の変化を求め，相互の関連をはっきりさせておく．使用する測定器は，BF_3 カウンタおよびはくである。

3) 中性子エネルギースペクトル（コンバータ表面における）の測定.

コンバータの持つ分裂スペクトルを正確に測定する．使用測定器は，In, Ni, Fe, Al, P^{31}, S^{31} のように共鳴領域をもったはくである。

4) 中性子束分布の測定

コンバータ表面および水中での熱中性子束分布および速中性子束分布を測定する．使用測定器は，熱中性子測定用としては，BF_3 カウンタおよび箔を，速中性子測定用としては，ハースト形検出器を用いる。

5) γ 線束分布の測定

コンバータ表面および水中での γ 線束分布を測定する．使用測定器は電離箱および乾板である．またできうれば γ 線スペクトル分布を測定する予定である。

なお，前述した測定器は各しゃへい実験にもつかわれすべて金属性のケースに入れ，水密性が保たれるようになっている。

4. しゃへい実験

1) 中性子束の減衰測定

中性子減衰計算に用いられ，比較的実験とよく一致をみているのは，1950年 Albert-Welton によって発表された含水素物質を充分に伴うしゃへいの場合の除去理論である．しかし除去理論はあくまでも半経験的な理論であり，その適用にも限界がある．そこで，含水素の量をへらしていくことによる減衰の度合いがどこまで除去理論による計算であらわせうるかを調べ，あわせて，多重層効果による熱中性子，速中性子の減衰の状態の変化をしらべる。

2) γ 線束の減衰測定，$(n.\gamma)$ 線量についての多重層効果。

鉄，鉛，ボラル板の効果を実験によりはっきりさせる。

3) しゃへい材組合せ多重層の総合効果

鉛，鉄，ポリエチレン，水，コンクリート，ボラルなどの組み合わせによる γ 線量，中性子線量の総合効果（主点は各放射板のビルドアップにおかれる）を実験的に調べる。

4) しゃへい体の不規則形状による中性子および γ 線のストリーミング効果。

東海炉のスタンドパイプで代表されるようなしゃへい体の不規則形状による放射線のストリーミング効果を実験的に調べあわせ，定量的に解析する．主につかう材料はコンクリートである。

以上がそのあらましであり，本実験は，当社と川崎重工業が協同で担当することになっている。

V. 保 安 対 策

コンバータ装置使用時にウランコンバータからでる放射線は，バルクシールドタンク内の水およびコンクリートの壁でしゃへいされている。

しゃへい計算の結果によれば，水面では 10^{-2}mr/hr 以下，タンクの外壁面では 10^{-3}mr/hr 以下で放射線作業従事者に対する最大許容被暴線量を下まわり全く安全である。

またバルクシールドタンクには純水を使用しているので水中の不純物による放射能は問題はないが，その純水に含有される不純物を Na, Ca, S, Cl などであるとしてこれらが長時間中性子束にさらされ，飽和状態に達したとしても，その放射能は許容濃度をはるかに下まわり全く安全である。

さらに原子炉出力 100kW の時のコンバータの発熱量は約1W であり，熱的にも問題はない。

他方，なんらかの事故の際にウランコンバータをプール内からただちに引上げることができるように，コンバータを格納する金属性容器(Al 製)が用意されている。

放射線に照射された試料も，プール内に約1日放置すれば安全であり，試料をプール内に入れる時も洗浄することにより，試料の表面についている不純物はすべてとりのぞかれる.このようにして，コンバータ装置は全く安全なものであり，装置使用中に何一つ問題にすべき点はないと考える。

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。