

## 米 国 に 原 子 力 を 学 ん で

武 谷 清 昭

筆者は幸にも去年 10 月から米国にある、日本では原子炉技術訓練学校といっているのに入学することを得て、今夏帰国したので、米国において感じた原子炉に関する事について述べてみたいと思う。原子炉技術訓練学校は米国のアルゴンヌ国立研究所 (Argonne National Laboratory, Lemont, Illinois) にあって、School of Nuclear Science and Engineering (SNSE) という。私達のクラスは第 2 回の SNSE であって、世界各国 21 ケ国から 41 名、アメリカから 20 名という大きなものであって、その中で 8 ケ月ほど過すことを得、その間に原子炉およびそれに必要な学問を学び、アメリカ各地にある建設中の研究用原子炉、および発電用原子炉を、現在外国人の見学しうる範囲のうち、運転停止中の一つを除いてすべて見学することを得た。冶金学を専攻するものの立場で、冶金を主体にして以下述べて行こう。

この SNSE はアメリカの Atomic Energy Commission と International Cooperation Administration によって援助されていて、アイゼンハワーの原子力平和利用政策の一環として行われている。多くのアメリカ視察見学団と同じように、ワシントンにおける 1 週間の Orientation Course を受けて、米国の地理、歴史、経済、文化、労働問題等についての話を聞き、アメリカ全般に対する認識をいくらかでも深め、アメリカ国会、AEC 等の見学および落葉のワシントンを見物して、アメリカ生活に順応した後にシカゴに向けて出発する。シカゴの南部、シカゴ大学の一劃にロックフェラーによる国際学生のための宿舎、International House に入る。よく知られているように、このシカゴ大学では、1942 年に金属研究所の名称で Fermi の指導のもとに原子炉の連鎖反応に関する基礎的研究が行われた。そしてその年の 12 月

2 日には大学構内の Stagg 競技場の西側 (第 1 図) の地下室に、金属ウランにならないウラン酸化物とグラファイトとによる Chicago Pile-1 (CP-1) が完成され、そのスタンドの壁に On December 2, 1942, Man achieved here the first self-sustaining chain reaction and thereby initiated the controlled release of nuclear energy と記念碑をかかげて、一つの記念の場所となっている。それから二度移転して、現在は南西 20 マイル余のミシガン湖に注ぐ川沿いの丘陵の上のアルゴンヌ国立研究所 (ANL) (第 2 図) となっている。



第 2 図 ANL 正 面

ANL の中の 203 号という declassified の物理の建物の中の一翼が SNSE であって、そこで講義が行われている。その内容として次の六つの科目がある。

- i) Reactor Physics
- ii) Nuclear Engineering
- iii) Instrumentation
- iv) Chemistry
- v) Metallurgy
- vi) Separation Process

これらの科目には、原則として 100, 200, 300 のコースがあって、専門外の人達にも判りやすい 100 コースを、また専攻者たちのために 200 コースを、そして原子炉を持っている国の人達のために 300 のセミナーコースを与えてくれている。最初の 2 週間は毎日講義があって、学生達は各科目の講義程度を知り、最後に専任教授達と各料ごとに面接して各自の修めるコースを決める。

これが終ると毎週、月、水、金が講義であり、火、木に次の 3 種の実験を順次行っていく。それは

- i) Reactor Physics and Reactor Engineering
- ii) Metallurgy
- iii) Chemistry and Separation

である。



第 1 図 Stagg 競技場西側

午前 7 時 45 分 International House から専用バスが出発し、9 時前に 203 号館の前に着き、9 時から授業、あるいは実験が始まる。それから午後 6 時 International House に帰るまでの間、4 時からのお茶の時間に教授と学生との団欒に過すほかは比較的忙しい。

原子炉工学を構成する学問が何であるか、という点についてはまだ結論的には出ていないが、先に述べた 6 科目は一応妥当なものと考えられる。先に述べた実験と講義について、筆者の受けたコースについて簡単に述べてみよう。

**Reactor Physics** これは主に原子炉の理論と思えばよく、内容的にはほぼ Glasstone and Edlund の The Elements of Nuclear Reactor Theory と同程度である。それに加えて高速中性子炉の特別講義と原子炉の 2 groupe の計算の実習がある。

**Nuclear Engineering** これは機械工学の領域に大部入るもので、熱伝導、沸騰熱伝達、流体理論、原子炉内熱発生、炉内放射線量の計算、遮蔽計算および ANL で設計された原子炉の設計講義などであって、原子炉一般に関する雑学である。Reactor Physics はすべて理論的であり、わが国においても実施可能であろうが、この講義は内容的にいて、設計計算の経験があって始めて行えるものであり、わが国では当分経験者が少ないので困難であろう。

**Instrumentation** これは、最初は放射線測定器についてで、次に制御に関する理論がある。放射線検出器とそれの回路理論、原子炉の運転に関する理論である。

**Chemistry** 最初に物理化学を行い、あとはすべてアクチナイド元素の化学である。

**Metallurgy** ほとんどがウランの冶金に関する部分である。その講義内容は核分裂性物質の資源、製錬、金属ウラン還元法、ウランの物理的性質、ウランの腐食、被覆材料、燃料要素の放射線損傷、トリウムの還元、金属、合金、シリコニウム、セラミック、粉末冶金などである。

**Separation Process** 主として核分裂生成物質の分離、その化学工学、高温冶金、ウラン鉱石製錬法、材料の腐食、廃棄物処理等についてである。

次に実験についてであるが、各実験の主要題目だけ述べてみよう。

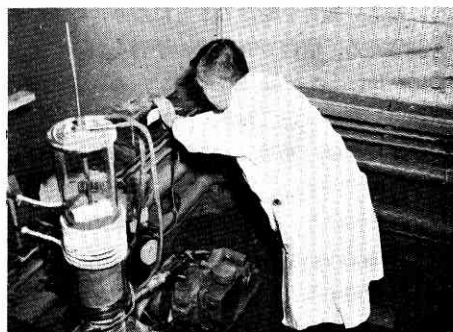
#### Reactor Physics and Reactor Engineering

- 1) 遮蔽実験
- 2) 中性子の結晶分光分析
- 3) 原子炉運転とそのおもな運転測定
- 4)  $\text{BF}_3$  計数管による断面積測定
- 5) ウラン照射による熱発生の測定
- 6) 燃料原素体の disadvantage factor 測定
- 7) 中性子および  $\gamma$  線による水溶液からのガス発生

- 8) 遮蔽ブラッグの試験
- 9) 液体金属実験
- 10) Exponential Pile (重水) 実験
- 11) Exponential Pile (グラファイト) 実験
- 12) 水膜係数の測定

#### Metallurgy

- 1) 照射された炭素鋼の強さと延性、衝撃値



第 3 図 学生用冶金実験室における筆者

- 2) 照射された Cu-Au 合金の電気抵抗
- 3) ウランの金属組織
- 4) 300°C でのウランの腐食
- 5) 300°C での 2S アルミニウムと Al-Ni 合金の腐食
- 6) 一次ウランをつくるためのポンプ還元
- 7) ウランの真空溶解とインゴットの製法
- 8) ウランの圧延、熱処理と試験
- 9) Al-U 合金の燃料要素の実験

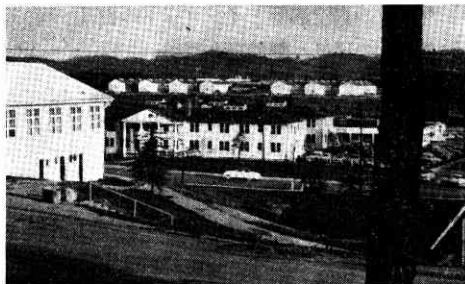
#### Chemistry and Separation Process

- 1) 基礎放射化学
  - 2) 共沈法によるウランとプルトニウムの分離
  - 3)  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  計数実験
  - 4) TTA によるトリウムとウランの分離
  - 5) プルトニウムとキュリウムの分離
  - 6) 核分裂生成物質の分離
  - 7) 核分裂生成物質からの  $\text{Sr}^{90}$  の分離
  - 8) 腐食速度におよぼす腐食生成物、空気、阻止剤の影響
  - 9) ウラの溶解
  - 10) イオン交換樹脂
  - 11) 液々抽出塔実験
  - 12) TBP 抽出実験
  - 13) 蒸溜実験
  - 14) 分溜実験
- 以上の通りである。

こうした原子炉工学に必要な基礎学問を 5 ヶ月余つづけて、これを前期という。これを見てみると前期というのは旧制大学の工学部の 1 年に似ている。将来この分野で立つに必要なと思われる基礎科目を一応修めることを目的としている。すなわち専門教育というよりは専門家と

しての一般基礎教育という感じが強い。これらを理解するには基礎的な理科専門教育を受けていれば十分である。各国からそれぞれの国で一応の職務にある人を集めて教育するので、長い教育期間を割くことができず、正月も冬休みもないというアメリカでは一寸考えられないほどで、教育期間を最低限に短縮してある。各学生は一応ある程度専門的領域にある者であるが、再度高等学校のように幅広い教育を受けることになり、非常な努力を必要としてくる。宿題や実験書の予習を行うとたいへん忙しくて、International House にいる一般大学の留学生と別扱いになるほどである。そして各国からの SNSE の学生が実に真剣に勉強し、それぞれの国の原子力の将来を担う意気であるのには驚くほどである。

アメリカにおけるこの種の教育は ORNL (Oak Ridge National Laboratory) においても行われているが、これはアメリカ市民のみを対称にしている。教育期間は1ケ年であって Oak Ridge School of Reactor Technology (ORSORT) といわれている。われわれが3月19日 SNSE の修学旅行としてオークリッジを訪ねた時には、所長 Dr. A. M. Weinberg を始めとして学生が歓迎のパーティを開いて、一夜歓談した。オークリッジは第4図に見られるようなテネシー州の片田舎の町であって、町全体がすべて戦時中に急造された官有物になっている。木質



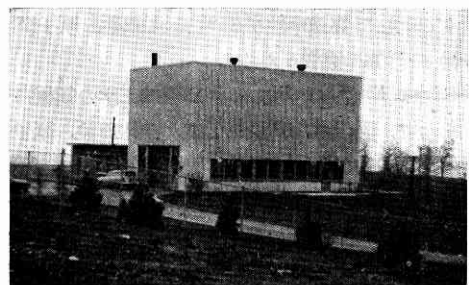
第4図 Oak Ridge の町

宿にも等しいそしてアメリカ人学生の不平をかったホテルなども、つい最近まで政府の所有物であった。というわけで町全体が殺風景で、アメリカ各地から来た学生である技術者、大学教授らが夫人からの苦情を聞きながら、1年間 ORSORT でひどくいじめられるということであった。Balk Shielding Reactor (いわゆるスイミングプール) を教育用原子炉として使用し、毎週宿題と試験があって青息吐息というところらしく、われわれの歓迎会があるので試験が延期されると何所も同じく喜んでいった。この ORSORT の入学資格はQ クリヤランス程度らしく、講義内容は未開禁 (classified) のデーターを教えられているとのことである。

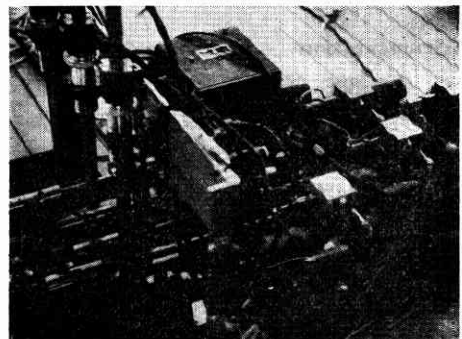
この二つの学校がアメリカにおける原子炉技術を教える学校であるといつてよいであろう。なんといっても原子炉技術はいまのところは国立研究所にしかないので、ANL でも ORNL でも教育者は研究者であって、教育

する期間しばらく研究を休むという状態で、原子炉の研究に忙しい人は1年で再び研究に帰るようである。

原子炉がある大学としては、North Carolina State College と Pennsylvania State University とがある。前者にはウォーターボイラーがあり、後者にはスイミングプールがある。技術者その他の点で大学での原子炉の運転は、ただでさえ大学の教授陣が不足している時、なかなか得難く、当時 North Carolina も修理中であり、Penn. State のも常時運転はまだという感じであった。この炉は極めて急いで建造したものらしく、立屋の外観も第5図に見られる通り簡単であって、内部の原子炉の制御部分第6図を見ても驚くくらい簡単である。ジュネーブ会議の報告にも見られるように地下室の部分が実験



第5図 Penn. State University のスイミングプール立屋



第6図 スイミングプール制御部分

室になっているが、実験用器具はほとんど見当らず、放射線測定器が数台あるだけであった。私が行った当時の話では一度臨界になったとのことであったが、炉心の中性子束を測定する BF<sub>3</sub> 計数管装置の故障を数人で修繕していた。

SNSE での教育で、3月中旬に Field Trip と称して国立研究所や建設中の原子力発電所を見学して歩いたが、雪の降り積る中をデトロイトからハイウエーを、何台か雪で迂り衝突した自動車を見ながら、アンナパーのミシガン大学に到着した。この大学の中にいま Phoenix Project と称する原子力の平和的利用のみを目的として、秘密研究の全くない計画が実施されている。この炉はバブコックのスイミングプールであって、新しい実験をも含めた建物の中にできつつあった。原子炉の所か



第9図 建設中の PWR

製造するかという工学的問題にある。PWR の建設現場に行くと、その建築段階にもよるが、土木建築の機械が最も活躍していた。

HRT, PWR は比較的に工業的な感じの強いものであるが、SRE は現場に行くと、発電能力の割合には炉心部分が大きくて研究用原子炉に近い感じを与えられる。

ピッツバーグからデトロイトに向かって出発し、デトロイトでは APDA (Atomic Power Development Association) を訪ねた。Detroit Edison からは学友が一人来ているが、APDA はこれら会社の原子力発電に対する研究協力会社であって、いま高速中性子増殖発電用原子炉を設計している。この発電炉は中性子束  $10^{15}$  個/cm<sup>2</sup>/sec であり、熱出力 300 MW, 電気出力 100 MW という大きな炉であるが、EBR-2 と同じように苦心をして設計したり改良したりしている。この会社は民間会社であって実験設備は持っていないで、設計だけ行っているのであるが、非常に好都合なことには国立研究所などで研究が行われその結果が得られると、classified であっても自由に設計に適用できる点はまことに羨しい次第である。

これから SNSE の後期が始まることになる。後期は卒業論文に相当して、発電用原子炉の設計と専門領域での実験を行う。筆者は燃料要素の最も複雑な EBWR-2 の設計、特に燃料部分を行い、実験は原子炉の研究が始まってから急に注目されたウランとその合金に関する実験を行った。

筆者は冶金学専攻であったために、Dr. Wilkinson 教授のご好意によって ANL の冶金部 (Metallurgy Division) の見学をすることを得た。冶金部の建物は、

Bld. No. 15 Metallurgy

Bld. No. 16 Melting Fabrication

Bld. No. 17 Machinery

Bld. No. 19 Corrosion

Bld. No. 200 Plutonium Metallurgy

#### Bld. No. 301 Radiation Damage

さらに現在、液体金属実験とプルトニウム工場とが建設中である。ANL において建設中の部分 3 ケ所のうち 2 ケ所が冶金のためであり、いかに原子炉工学に対しての冶金の重要性が大きいかわかる。

最近の研究特に目的研究を行っているところでは、従来のように各個の研究にだけに依存しては進歩が遅いという考えから、組織的な研究を行うようになった。電気分野のように理論的に推察しうる領域の多いところでも然りであって、冶金の中で原子炉燃料を見出そうとする場合には全く物量的な研究方法であるのに驚く。

原子炉燃料として試験すべき性能は、ある試料について、恒温変態、熱分析、熱処理変化、電気抵抗、熱伝導度機械的試験、X線試験、金属組織

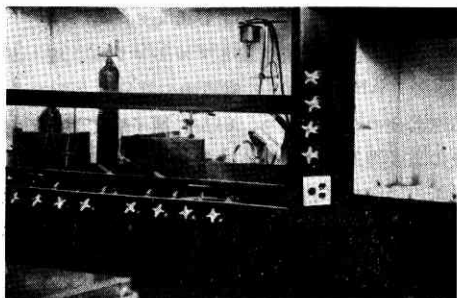
などであるが、これら各種性能の試験には最高級と思われるような設備が Bld. 15 にあって、senior metallurgist の指導の下に試料が流れてきて性能試験されている。この試験で合格したものが原子炉試験に回される。もちろんこの人間と設備を金にあかして整えた研究を行うにも、さらにその基礎になる実験室、例えば一室全部が自動恒温装置のある電気炉が 10 台以上あったり、あるいはウラン金属研磨台が数列に室全体にあるといった状況である。

プルトニウムを取扱う実験室も極めて興味があり、かつ高価なものである。およそありとあらゆる冶金学的な実験装置が全く glovebox の中にあるという状態である。しかも -1.5" 水圧の He 気流中で操作しているのは、プルトニウムの毒性と自然性によるのである。glovebox の中には溶解装置、研磨はもとより圧延機その他まで整えてあるのには驚く。

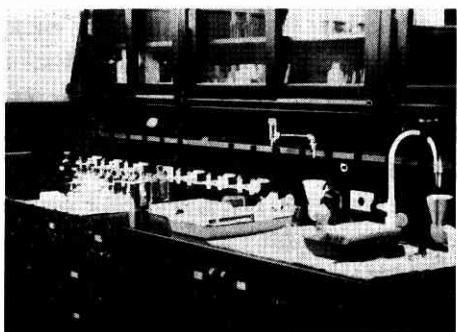
このように後期には冶金学の専攻の知識を得て、6 月初旬には再び Field Trip に出る。学業コースも終えて NRTS (National Reactor Testing Station) に行くのが目的であったが、途中デンバーに立寄りロッキー山脈国立公園を土、日曜日に見物し、夏なお雪をいただくロッキー山脈を彼方に見る砂漠の地に、EBR-1 その他を見学した。潜水艦用、航空機用原子炉などがあるここでは、ひとつひとつの炉が互いにその位置が分らない位離れた所に建設されていて暴走に注意してあった。

NRTS の見学の後、イエローストン国立公園などを見物してから南下して、ソルトレークシティに着き、ウランの製錬会社を見学して SNSE は解散になった。

(1956. 11. 5)



第 7 図 放射性同位元素実験室



第 8 図 放射性同位元素実験室

順次マニピュレーターのある hot, semi, cold の順に実験室が並んでいて、放射性同位元素の実験も行えるようになっている。その中の実験室を第 7, 8 図に示す。ここは比較的多額の研究費を注ぎ、原子力に関する講義も一部開始していた。こうした大学での原子力教育が軌道に乗ったところであろうと思わせる。

同じく MIT でも CP-5 型の原子炉を都心の大学の構内に構築するために大きな建物を建設中であったが、これが完成すればまた別の意味での教育用の原子炉にな

ら順次マニピュレーターのある hot, semi, cold の順に実験室が並んでいて、放射性同位元素の実験も行えるようになっている。その中の実験室を第 7, 8 図に示す。ここは比較的多額の研究費を注ぎ、原子力に関する講義も一部開始していた。こうした大学での原子力教育が軌道に乗ったところであろうと思わせる。

同じく MIT でも CP-5 型の原子炉を都心の大学の構内に構築するために大きな建物を建設中であったが、これが完成すればまた別の意味での教育用の原子炉にな

るであろう。しかしここは A. E. C. との間に classified の研究を数多く契約しているので、この点からも事情は、おのずから前の三つの大学の研究用原子炉とは異なるであろう。

民間の研究に供する原子炉としては一つある、それは民間会社 24 社の支持による Armour Research Foundation の Armour Research Institute にある 50,000 ワットのウォーターボイラーである。これは民間工業会社その他の利用に供するものであって、同時に委託された

研究も行う。この炉の維持が主として先の 24 社によって行われ、単独では原子炉を持ちえない会社が 1 日以下の短半減期の放射性同位元素の製造、中性子回折や活性化分析の実験に利用している。この建物には学生の教育のための設備も整えてある。これまでの教育の点から見た原子炉、大学の次に発電用炉を主体として Field Trip の順を追って述べてみる。

シカゴを早朝出発して一路南下する。シカゴに降り積っていた雪も屋頂には雪の全くない、一面の耕作地であるインディア州を走る。見渡す限り黒々とした肥沃の地に視野の限り 1 軒位の農家しかない田舎を走り、競馬で有名なケンタッキー州のルイビルに一泊して、翌日には水仙、山吹の黄も鮮やかなテネシー州の ORNL に着く。

ORNL では Low-Intensity Training Reactor, BSR, X-10 などを見学し、Solid State, MTR 型燃料要素製造現場などを見学する。ORNL の裏山を越えた山間に HRT (Homogeneous Reactor Testing) が建設中であったが、この炉は元来が均質液体燃料炉であるため、硫酸ウラニウムを重水に溶かした液体の循環用の、ステンレス 347 のパイプが蜘蛛の巣のように配管されている。もちろんこの炉は実験発電用原子炉であるので、完成運転後のデータを取るための測定計器に接続したパイプが無数にある。そのために HRT による発電電気単価は幾分高価になるが、次回の設計では建設費も低下し、電気単価も安くなるであろう。筆者が見学した建設中のいずれの試験発電用原子炉にもあてはまることであるが、原子炉の炉心に相当する部分はいずれも比較的小さく、それ以外の配管、熱交換器の部分が大部分を占めている。

なお現在実験用発電炉として建設している主なものを挙げると、下表のようになる。

	HRT	EBWR-2	EBR-2	PWR	SRE
	(Homogeneous	(Experimental	(Experimental	(Pressurized	(Sodium
	Reactor	Boiling Water	Breeder	Water	Reactor
発電炉名	Testing)	Reactor)	Reactor)	Reactor)	Experiment)
熱出力 kW	65,000	20,000	62,500	260,000	20,000
電気出力 kW	16,000	5,000	17,500	60,000	7,500
建設者	ORNL	ANL	ANL	Westinghouse	North American Aviation
建設地	Oak Ridge Tenn.	Lemont Ill.	Lemont Ill.	Shipping Port Pa.	Canoga Park Calif.
完成年月日	1956	1958	1960	1957	1956

ORNL 見学を終了して翌日には、ビッパークの近郊にある PWR を見学する(第 9 図)。この炉は完成されれば実用の発電網にのせるというが、この発電炉は巨大であってウェスチングハウスの総合工業力によって初めて完成され得そうな代物である。その巨大さのために、工芸技術の最高水準を駆使しているようである。現場の技師が建設中にも部分的に図面変更があるといっておぼしめていたが、PWR の問題点は炉心の物理的な問題ではなくて、いかにして 2,000 psi の圧力に耐える大きな熱交換器を