

環境影響から見た中性子源 施設の社会的問題点

小出裕章・今中哲二・海老沢徹・川野真治・
小林圭二（京大炉）

京都大学原子炉実験所
第18回学術講演会
講演要旨集 別刷

昭和59年 3 月15日・16日

(C-11) 環境影響から見た中性子源施設の社会的問題点

○小出裕章・今中哲二・海老沢徹・川野真治・小林圭二(京大・炉)

1. はじめに

18世紀以降、科学の重点は“未知なものを明らかにする”という純粋に知的なものから、“利用”を主要な課題とするものへと移り、また、今日では、科学研究は非常に巨額な費用・巨大な施設・莫大なエネルギーを消費するようになっている。同時に、軍事・民衆と問わず“科学”の応用範囲もますます拡大していき、核兵器の例を出すまでもなく、科学の社会や環境に与える影響もますます大きくなっている。人類の生存そのものと対立する場合すら現われている。“基礎研究”も科学の一翼であり、そうして科学全体の動向と無縁でない。しかし、“基礎研究”の場合、社会への影響は直接的に見えにくいこともあり、一般的には社会的意味を考慮しない。 “とにかく基礎は大切だ”という“研究至上主義”に陥りがちであった。しかし、“基礎研究”も社会と無縁でないのだから、それを抱えるという多様な意味を明らかにする責任は、誰をいっても、“基礎研究”を行う研究者自身にあると言うべきだろう。

本稿では、社会的意味という点に余りに狭いところもあるが、往々にして研究者の目見落としておられる環境影響問題をとりあげ、中性子源施設の存在という社会的問題点と考える。中性子源施設としては、定常出力型研究炉である京大原子炉実験所の高中性子束炉(KUHFBR)と、Spallation Neutron SourceであるDIANE(Deutsche Intensitätsmodulierte Anlage für Neutronen Experimente)⁽¹⁾とをとりあげる。

2. Spallation Neutron Source の概要

今日迄、種々の中性子源が利用されてきたが、そのうち最も多く利用されてきた施設は定常出力型研究炉であることは疑いない。しかし、定常出力型研究炉の場合、主として熱除去の制約から、得られる熱中性子束には自らの限界がある。事実、図1⁽²⁾にも示すように、この型の研究炉から得られる熱中性子束は、30年前から定まっていた約 10^{15} n/cm²・secに達している。

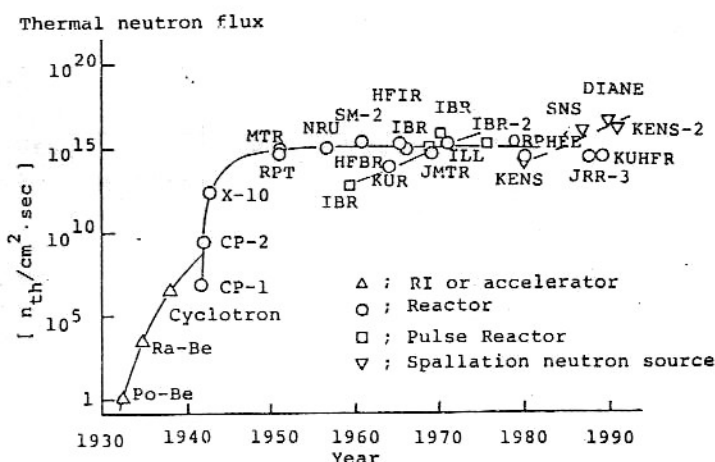


図1. 各種中性子源施設における熱中性子束の変遷

この状態を当面超えられる可能性のある施設は、パルス型研究炉と、本稿に取り扱う Spallation Neutron Source である。

高エネルギー粒子 (10 MeV 以上) が物質を衝撃すると、少量の中性子が生成することによって Spallation (核破砕) 反応と知られている。Spallation 過程の概要を図 2⁽³⁾ に示す。

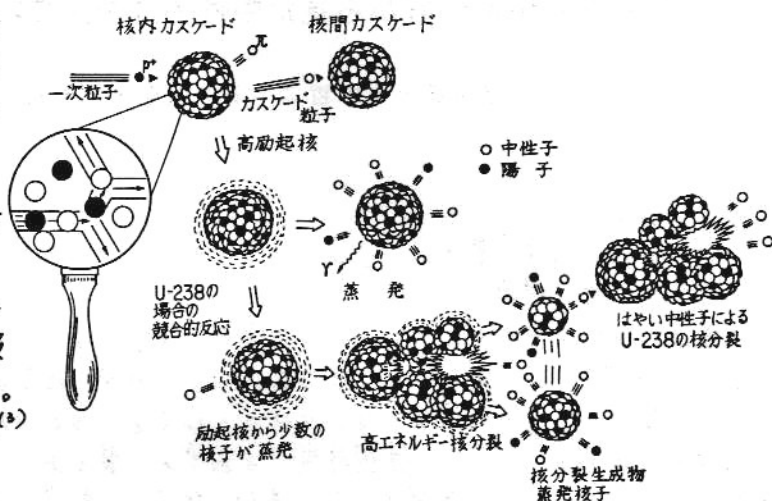


図 2. Spallation 過程の概要

加速器技術の進歩と共に、定常出力型原子炉が得られる熱中性子束の限界を越え、パルス状の中性子が得られるというメリットがあるため、Spallation Neutron Source が注目を受けるようになり、世界各国でこの種の施設の建設が計画されている。本稿とりあげた DIANE もそのうちの第一基であり、もし完成すれば世界最強の中性子源施設になり、中性子源施設としての主要な性能については、KUHF と DIANE の比較を表 1^{(3),(4),(5)} に示す。

DIANE が得られる尖頭熱中性子束は、KUHF に比べて 1~2 桁以上高いこと、平均熱中性子束と比べても、DIANE の方が KUHF よりも優れていることが利点である。こうした施設の運転には、4 万 kW もの電力が必要であること、Target の熱的余剰がかなり厳しいものがあることなどが判る。

表-1 KUHF と SNQ (DIANE) との主要性能比較

	KUFR	DIANE			
		Pb-Target	U-Target	第一段階	
利用可能中性子発生総数[n/s]	~ 1E18		8.5E17	~ 1.6E18	~ 5E17
平均熱中性子束[n/cm ² ·sec]	2 ~ 3E14	(H2O)moderator	7E14	1.2E15	2.8E14
		(D2O)moderator	6.8E14	1.2E15	2.8E14
尖頭熱中性子束[n/cm ² ·sec]	-	(H2O)moderator	1.3E16	4.2E16	9.9E15
		(D2O)moderator	5.6E15	1.6E16	3.8E15
平均熱出力 [MW]	30	Target部分全体	4.1	15	
		Target のみ	2.9	10 ~ 12	
運転所要電力 [MW]	~ 3 熱出力の1割	加速器本体のみ	24	同左	
		施設全体	40	同左	
燃料 or Target 材料	U-235(MEUorHEU)	Pb	depleted U	同左 or W	
加速器性能	-	p energy [GeV]	1.1	1.1	0.35
		平均電流 [mA]	5	同左	同左
		出力時電流[mA]	100	200	同左
		p パルス巾[ms]	0.5	0.25	同左
		繰返し数 [Hz]	100	同左	同左
出力密度 * [kW/l] (p* のTargetへの入射部分**)	200	平均	6000	15000	
		出力時	120000	600000	

* BWR の平均出力密度: ~50 [kW/l]; PWR の平均出力密度: ~90 [kW/l]; 高速炉の平均出力密度: ~300 [kW/l]

** Target 全体での平均出力密度は、~8 [kW/l]

3. 平常運転時の環境影響

平常運転時の安全問題として、KUHF Rにはトリチウム、重水及放射体 ^{60}Co 、 ^{40}Ar 問題等がある。DIANEには、ビーム系の誘導放射能、放射線損傷、中性子Sky-Shine問題等が考えられる。ここでは環境影響という観点からDIANEの中性子Sky-Shine問題、KUHF Rの ^{40}Ar 問題ととりあげて検討する。

加速器からの中性子Sky-Shine問題は、今日の大型加速器においては重要な問題である。これにも種々の評価手法が提案されている。評価手法は大きく分けて、①大型計算機を利用するMonte Carlo法等によるシミュレーション、②実際の加速器周辺の測定データに基づいた経験式による方法の二種類である。詳細な施設設計がなされている数値もなし、詳細な計算をする必要が本稿の目的でもない。ここでは②の経験式による方法を採用する。経験式にも種々のものがある。それを具体的な施設に適用する方法も様々である。一本本稿では、広く利用されているThomasの式を利用すると共に、中性子源を施設建屋屋上と二次元の点分布とせよという方法⁽⁶⁾を採用する。Thomasの式は、

$$\varphi(r) = \frac{a \cdot Q}{4\pi r^2} \left\{ 1 - e^{-r/\mu} \right\} e^{-r/\lambda}$$

$\varphi(r)$: 線源から距離 r での中性子束

λ : 空気中での中性子の減衰距離

Q : 中性子の単位時間当りの発生数

$a = 2.8$, $\mu = 56(\text{cm})$

入は中性子エネルギーに依存し、Thomasが当初与えた267mという値から、最近では1300mという値⁽⁷⁾が報告されている。そして、ここには267, 600, 1300(m)の三種類について計算を行う。中性子源となる施設建屋の形状と中性子源強度については、図3に示し、計算結果を、本実験所の敷地と共に、図4に示す。図4から明らかにように、敷地境界は5 mrem/yrという放射線基準を守り

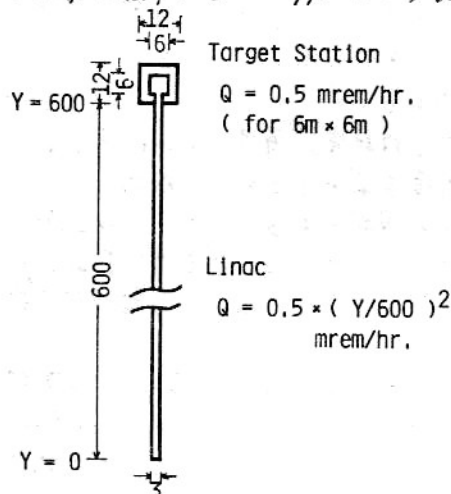


図3. 中性子Sky-Shine線量計算のための建屋モデル

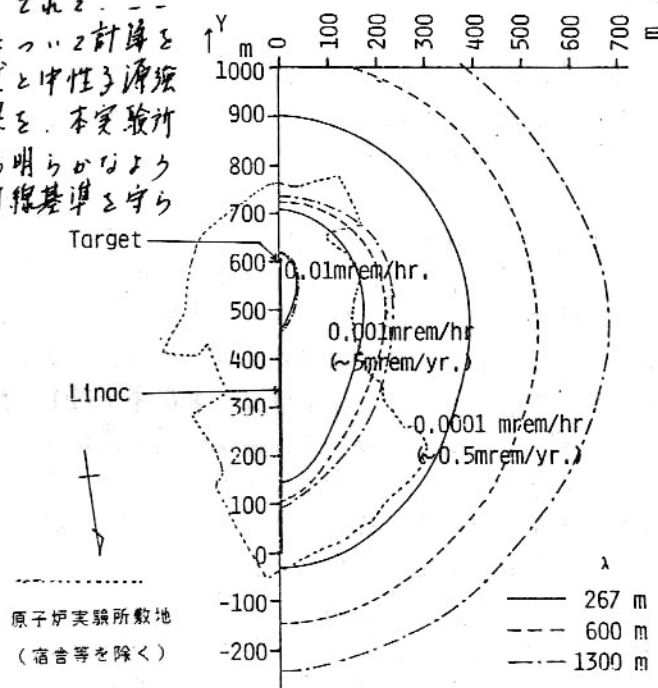
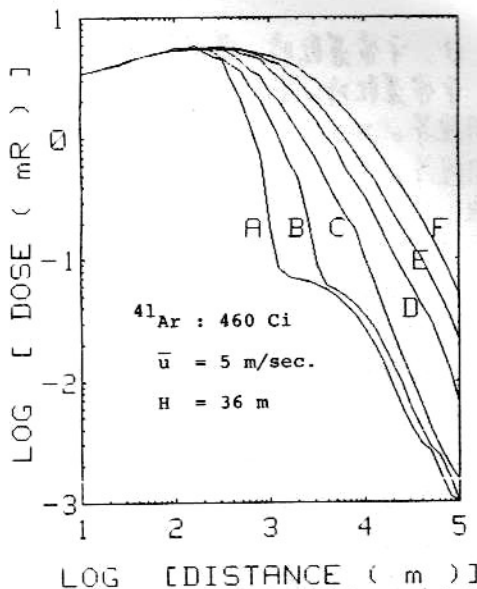


図4. 中性子Sky-Shine線量のモデル計算結果

わけなうとはいえず、中性子 Sky-Shine は、この種の施設建設に当たって最大の障害になると思われる。

一方、KUHFR の場合、その完成時には一号炉と合わせ、年間 460 Ci の ^{41}Ar が放出され、その ^{41}Ar による敷地境界での被曝線量は、およそ 0.1 ~ 0.5 mrem/yr であると評価される⁽⁵⁾。計算コードの詳細は省略するが、KUHFR からの ^{41}Ar 放出によって、一年中同一方向に風が吹くと仮定した上での風下軸上に於ける被曝線量の計算結果を、図 5 に示す。図 5 から明らかなように、 ^{41}Ar による被曝線量は必ずしも敷地境界で最大値となる訳ではない。その上、比較的安定な気条件の下では数 km 離れた被曝線量はほとんど減衰しない。



従って、敷地境界での被曝線量を問題にする場合には KUHFR よりも DIANE のような Spallation Neutron Source の方が厳しく思われ、一方住民全体の総被曝線量を問題にするならば、逆に KUHFR の方が大さくなる可能性が高い。こうした問題は、具体的に施設の選取をする場合には、より詳細に評価する必要がある。

4. 事故時、および廃(棄)物としての危険性

中性子源施設の目的は、もちろん中性子を利用することであるが、実際には発生した中性子のうちで利用できなかったのはごく一部であり、多くの中性子は周回の物質を放射化することになる。さらに重要なことは、原子炉の炉心や Spallation Neutron Source の Target 中には莫大な放射性核種が生成されることである。こうして生成される放射性核種が環境に付着してどれ程の危険となるかは、種々の要因に依存する。事故に関しては、その発生確率とその事故によって引き起こされる影響の大きさとの積をもった「リスク」と定義する場合が多い。しかし、発電用軽水炉については「原子炉安全性研究」⁽⁸⁾等幾つもの研究があるものの、事故というものの本質上、事故発生確率の絶対値を求めることには成功していない⁽⁹⁾。研究炉については、その種の研究は僅かしかないが現状である。そして DIANE のような施設については全くなされていない。表 1 に示したように、DIANE の Target 入射部分の出力密度は極端に高く、Target の冷却に支障があれば、Target 溶融→RI 放出という事故が発生する恐れがある。

ここでは、事故の発生確率は問題としないうことにし、また炉心あるいは Target 中に蓄積していった放射性核種の全量が事故時の危険に寄与すると思え、そこで炉心あるいは Target 中に蓄積した放射性核種の量と、個々の核種について ICRP が与えている DAC (誘導空気中濃度)⁽¹⁰⁾ の比の総和をもった「相対リスク」(この値は、その放射性核種と、その許

容濃度の逆薄めるために必要な空気量[m³]を表わす。)と定義し、それを危険度の尺度に用いることにする。

KUHF Rの場合、同一炉心で24日間運転すると計画されており⁽¹²⁾、DIANEの場合は同一Targetで約2年間運転すると考えられている⁽¹³⁾。そこで、事故はそれぞれの連続運転の最後に発生するとし、その時点に炉心内あるいはTarget内に蓄積している放射性核種を対象に、相対リスクを評価する。ただし、計算の基本仮定として、以下の式を用いた。

$$\text{KUHF R} : 1.6 \times 10^{-6} \text{ mol-U/s} + 9.4 \times 10^{17} \text{ n/s} \rightarrow 1.9 \times 10^{18} \text{ F.P. (th) / s} + 2.3 \times 10^{18} \text{ n/s} + 30 \text{ MW}$$

$$\text{DIANE (Pb)} : 5.2 \times 10^{-8} \text{ mol-Pb/s} + 3.1 \times 10^{16} \text{ p/s} \rightarrow 1.2 \times 10^{17} \text{ S.F. / s} + 8.4 \times 10^{15} \text{ F.P. (H) / s} + 8.5 \times 10^{17} \text{ n/s} + 4.1 \text{ MW}$$

$$\text{DIANE (U)} : 5.2 \times 10^{-8} \text{ mol-U/s} + 3.1 \times 10^{16} \text{ p/s} \rightarrow 1.7 \times 10^{16} \text{ S.F. / s} + 1.1 \times 10^{17} \text{ F.P. (H) / s} + 1.7 \times 10^{17} \text{ F.P. (th) / s} + 1.8 \times 10^{17} \text{ R.I. / s} + 1.6 \times 10^{18} \text{ n/s} + 15 \text{ MW}$$

F.P. (th); Fission Products (thermal fission); F.P. (H); Fission Products (high energy fission)
S.F.; Spallation Fragments; R.I.; Other Radioactive Isotopes (ex. (n, γ), (n, 2n), (n, 3n) etc.)

DIANEに関する上の式は、主として文献(12)に示されているデータに基づいて導いた。また、上式には記載していないが、Target周辺の構造材・減速材等中の生成核種も含めた。(KUHF Rの⁶⁰Co, T等も含めていない。)PbをTargetに用いた場合の、各核種のS.F.収率は主として同文献に従った。UをTargetに用いた場合のデータは示されていないため、その場合の収率はRudstam's formula⁽¹³⁾を用いてErからU迄の各核種の生成断面積を評価し、それを生成するS.F.の総数に配分する方法で収率を決定した。(Erより原子番号の小さい核種の収率は小さい。)High energy fissionによる収率も不明なため、Uのfast fissionデータは

Relative Risk [m³]
[10⁶]

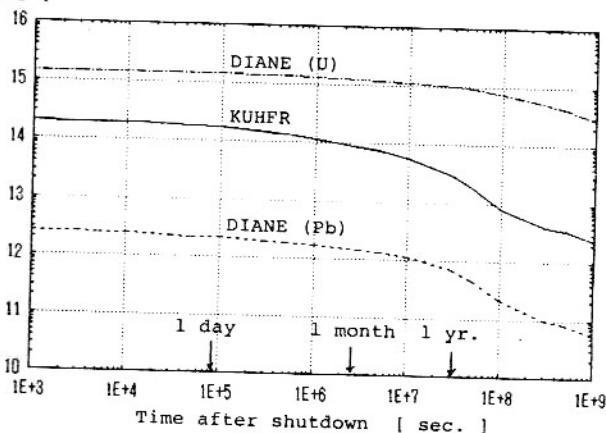


図6. 炉心あるいはTarget中に蓄積する放射性核種の相対リスク

代用した。また、UをTargetに使用した場合の(n, f), (n, 2n), (n, 3n)反応等によって生成するR.I. (主としてアプセニド)、およびKUHF Rで生成するアプセニドについては、本稿では全く評価しなかった。従って、本稿の評価結果は、かなりの誤差(特に、長期経過後のリスクは過小評価)を含んでいる。しかし、施設どうしの比較という点で全体の見直しを得るためには充分有用であると考えている。

評価結果を図6に示す。

また、仮に施設をその寿命中太過なく運転しえたとすると、ひとたび生成させてしまった廃(棄)物は本来への遺産として残す以外にない。それについても、事故時の取り扱いと同様に相対リスクを評価する。ただし、この場合KUHF RもDIANEも共に20年間連続して運転されたものとする。廃(棄)物としての相対リスクの評価結果を図7に示す。事故時に生じた廃(棄)物として生じた、不可避的に生じようとする放射性核種の危険度は、

DIANEがTargetにPbを使用している限り、KUHF Rなどよりも小さい。しかし、DIANEがTargetにUを使用するとすれば、その危険度はKUHF Rのものに凌ぐものになると思われる。

“研究”上の要請から Spallation Neutron Source の Target にはUが用いられようとしているが、そうした場合の危険度の飛躍的な増加について十分な考慮を払う必要は乏しいものと言えよう。また、一言付言しておくならば、先にも述べたように、DIANEの運転には40 MWe の電力が必要のため、それを仮に原子力発電から得るとすれば、約120 MW級の発電所が必要で、そこから生じるF.P.等の量はKUHF Rのものをはるかに凌ぐことになる。

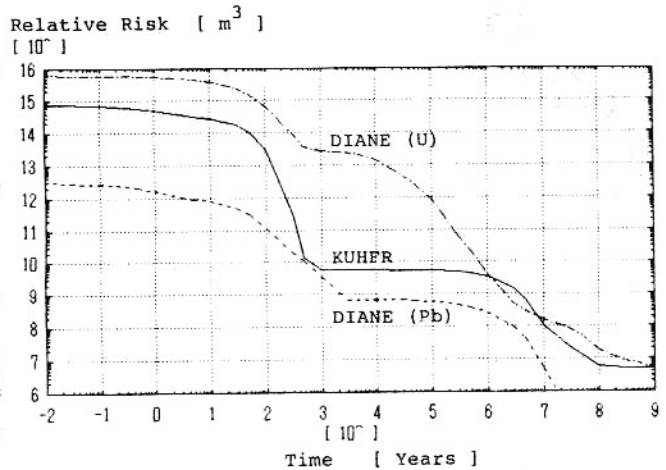


図7 廃(棄)物としての相対リスク比較

5. その他の環境影響問題

ある施設の危険度を考える場合においても、その施設のみに目を奪われ、その施設に関連する全体の流れは往々にして見失われがちである。KUHF Rの場合、核燃料に関連するものに限らず、少くとも図8に示す流れが必要である。本稿はここにこの問題に関して来たのは、模式的に言えば(6)、(7)、(10)のごく一部に過ぎず、その他はすべて無視している。(1)、(8)における労働者・住民の被曝、(5)の管理・使用法(燃料の材料)等検討しなければならない課題は沢山ある。ここでは、ウラン濃縮に関連して(2)、(3)、(4)に触れることにする。KUHF Rが燃料を得るための諸パラメータを

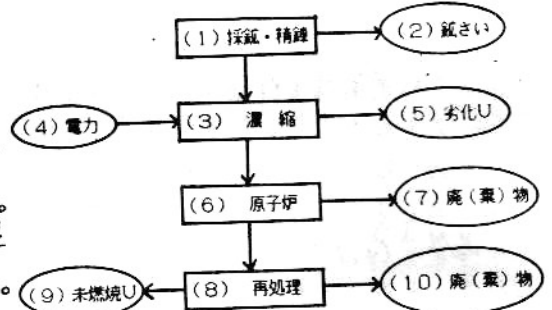


図8. 核燃料に関連する全体の流れ

表2 KUHF R の一年分の燃料を得るための諸パラメータ

	燃料濃縮度 (%)	燃料燃焼度 (%)	燃料必要量 (kg)	供給ウラン量 (ton)	濃縮作業量 (SWU-kg)	濃縮に必要な電力量 GWH	MW-年	鉱さい中 Ra-226量(Ci)
KUHF R (30MWth)	93	31%	35	6.4	8200	21	2.3	2.1
	45	45%	50	4.4	5000	13	1.4	1.5
100万kWe原発	3	28000MW/t	40000	220	172000	4300	49	73

熱出力では100分の1以下にはならない。しかし、濃縮度の高いウランを使用するため、供給ウラン量と比べれば30~50分の1になる。濃縮に必要な電力を言えば20~35分の1に達し、それなりの影響を環境に与えることになる。例えば、中濃縮ウランを使用する場合でも、1年間に1.5 Ciの²²⁶Raを最終として環境中に設置することになり、先の相対

リステすれば 6×10^9 [m³] に達する。そして、この値は親核種である ²³⁰Th の半減期 8 万年に従ってしか減衰しない。(この地抽出しえずに貯蔵したウランからの寄与もある。) KUHF R は、その運転段階において年間 460 Ci (うち 60 Ci は KUHF R からのもの) の ⁴¹Ar を放出する。その相対リステは 1.7×10^9 [m³] であり、1.83 時間の半減期で減衰する。これら両者の値を比べてみれば、ある施設の環境影響を考える場合に、その施設と全体の流れから切り離して考えるのは著しく不十分であることが解る。

また先にも述べたが、DIANE の場合、施設全体で 40 MWe の電力 (100 万 kW の原子力発電所の 25 分の 1) を必要とするから、その電力を原子力発電所から得るとすれば、やはり KUHF R の燃料確保と同程度の ²⁴⁴Ra を環境中に設置することになる。

6. おわりに

いかなる基礎研究も、それを遂行するためには直接的・間接的に環境に影響を及ぼす。本稿では、そのうち幾つかの問題ととり上げ、研究炉と Spallation Neutron Source の比較を行った。その結果、① 施設全体の被曝線量は、研究炉の方が高い可能性があるが、Spallation Neutron Source では中性子 Sky-shine より深刻な立地問題が生じる。② Spallation Neutron Source も放射性核種の生成という意味では本質的に研究炉と変わらない。Target に Pb を用いる限り、生成放射性核種の危険度は研究炉のものより小さいが、Target に U を用いるようになれば、その危険度は研究炉を凌ぐものになる。③ 環境影響は、個別の施設として考えるだけでは不十分で、その施設に関連する全体の流れを考慮する必要がある。ことなどを示した。仮に研究のために中性子源が必要であるとしても、少なくとも① 研究の目的・意義、② そのために必要な施設性能、③ 不可避的に抱えてしまう環境影響等をよく考慮し、その関連を明らかにすることが、研究者の最低限の責務であり、「研究至上主義」の下に、社会的問題を無視することは決して許されない。

<参考文献>

- (1) G.S.Bauer and B.Alefeld; The Spallation Neutron Source; IFF-Bulletin 18-1981
- (2) 坂田徳雄 他; 100 万人の原子力基礎編; アグネ (1971) 250 頁作成
- (3) G.S.Bauer; The general concept for a spallation neutron source in the Federal Republic of Germany; ATOMKERNENERGIE/KERNTECHNIK, Vol. 41, No. 4 (1982)
- (4) G.S.Bauer; The SNQ-Project Status report as of August 1983; ICANS-VII (Sep. 12-16, 1983)
- (5) 京都大学研究用原子炉の設置変更の承認申請書 (高中性子束の増設)
- (6) K.Kato et al.; Skyshine radiation around 12 GeV proton synchrotron; KEK-72-4 (Apr., 1972)
- (7) R.H.Tomas; The radiological impact of high-energy accelerators on the environment; KEK-78-20 (Nov., 1978)
- (8) USNRC; Reactor Safety Study; WASH-1400, NUREG-75/014 (1975)
- (9) USNRC; Risk assessment review group report to the USNRC; NUREG/CR-0400 (Sep. 1978)
- (10) ICRP Publication-30, Part I, II, III
- (11) H.Stechmesser; Mechanical design of the target station DIANE of the German spallation neutron source project and its rotating target; ATOMKERNENERGIE/KERNTECHNIK, Vol. 41, No. 4 (1982)
- (12) T.W.Armstrong, P.Cloth, D.Filges and R.D.Neef; Theoretical target physics studies for the SNQ spallation neutron source; Jül-Spez-120 (July, 1982)
- (13) M.Barbier; Induced radioactivity; North-Holland Publishing Company (1969)

ENVIRONMENTAL IMPACT OF NEUTRON SOURCE FACILITIES

Hiroaki Koide, Tetsuji Imanaka, Tohru Ebisawa,

Shinji Kawano and Keiji Kobayashi

(Research Reactor Institute, Kyoto University, Osaka 590-04)

Neutron source facilities have been constructed without deep consideration about their impact on human society and environment. It is necessary to assess their impact if we need neutron source facilities. In this work, we compared the risk of a research reactor (KUFR) with that of a spallation neutron source facility (DIANE) from the viewpoint of the environmental impact.

The results are as follows:

- (1) The spallation neutron source has a serious problem of siting because of the neutron skyshine.
- (2) As far as Pb target is used, the risk of radioactive nuclides produced in the spallation neutron source is less than that in the research reactor. If U target is used, however, the former will exceed the latter.

In addition, we discussed the necessity to consider the risk of overall stages that are accompanied with the operation of the facilities.