

加速器の応用 — 明日への展望を主として —

ARGONNE NATIONAL LABORATORY 木村一治

§ 1. パルス状白色中性子による凝集体構造解析 (丁史的展望)

パルス状の白色中性子 (主として熱中性子領域) があれば D/F 法を用いて、単色の場合と同様に中性子回折像が得られることは P. EGELSTAFF が (より早くから) 予見されていたことはあるが、1965年、B. BURAS がパルス原子炉を用いて実証し、1967年東北大 300 MeV 電子リニアックを用いて DEBYE-SCHERRER 像がえられた。東北大ではその後も引きつらき改良が行われ、物質構造解析に役立つことが実証された。この方法の発展はしかしながら必ずしも平坦ではない。X線回折と同様な手法で行ける在来原子炉を用いる方法にくらべ、あまりにも異なっているで、現在に至っても未だ、いわゆる中性子回折屋と言はれる人々の全面的支持を得ていないわけではない。

1967~73 ころには、パルス炉 (核燃料を一瞬超臨界にする) 又はパルスブースター (核燃料を用いてリニアックからの中性子を 10~100 倍くらいパルスの増倍する) がいろいろ計画され、つぶれて行った。私自身も日本のリニアック・ブースター計画を考慮したりした。核燃料を用いることは、(1) 核燃料使用に伴う諸々の問題、(2) パルス中が数  $\mu$  ~ 数 10  $\mu$  sec に及びて性能と落ち傾向、(3) 遷移中性子によるバックグラウンド、(4) 核燃料体系がパルスに伴うショックに耐えるか否かの工学的不安、などに直面する。

加速器オンリー ( $\text{U}^{238}$  を用いても連鎖反応は考えない) で行く計画が最近とみれば澄みかして来た。この方向は電子リニアックの (8, m) 反応を利用して初められたが 1969 ころより ARGONNE で J.M. CARPENTER がより高エネルギー陽子による重い核の SPALLATION 反応を利用するところが検討された。具体的には当時建設が始まった ZGS の入射器としての 500 MeV,  $5 \times 10^{12}$  PROTON/PULSE (予定) の陽子シンクロトロン利用である。この建設はある期間 CORNELL の 3 GeV 電子シンクロトロン (陽子なら 200 MeV) で代用されたが、来年本物が 500 MeV,  $1 \times 10^{12}$  p/p < " というビームを出す予定である。この場合、主体は高エネルギー物理であり、中性子は余ったビームの利用という立場であったが肝心の ZGS 本作の方が 1977 年末で閉鎖されること決定している。事態は複雑であるが、としかく、ZGS 入射器の利用は ZING 計画と呼ばれる、上記のビームで熱中性子束のビーム値  $1 \times 10^5 / \text{SEC CM}^2$  がえられる計算である。<sup>(1)(2)</sup>

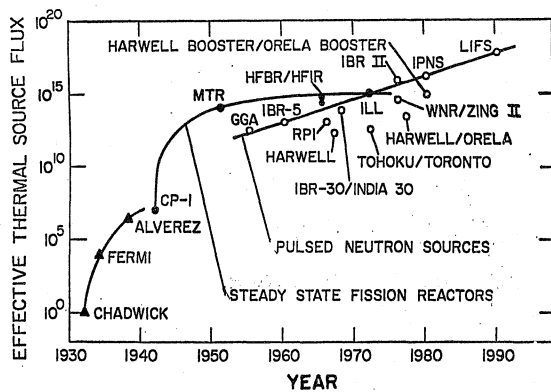
この値は研究用原子炉の与える熱中性子束の技術的に可能な最大値にほぼ等しく、利用価値はより高い。(この点についてはいろいろ議論の余地があるが省略する)。ZING 計画はしかしながら WASHINGTON の興味を引かず、むしろ一桁高い  $10^6 / \text{SEC CM}^2$  を指向することを示された。1974年 ARGONNE で私は ZING プラス核燃料ブースターでこれを実現することを検討して来たが、諸般の事情からむしろ  $5 \times 10^{13}$  p/p という大電流陽子シンクロトロンを新たに建設する方が好ましいという結論に達した。これは IPNS 計画によれば 70 MeV 陽子リニアック入射器、800 MeV,  $5 \times 10^{13}$  p/p, 60 Hz の大電流シンクロトロン、 $\text{U}^{238}$  中性子ターゲット及び各種中性子測定装置を主体として

\$60Mの予算が要求されている。たゞ、ZGSの閉鎖に伴い、その附帯設備が利用できず、約\$40Mで足りる。現在 ARGONNE の TOP PRIORITY PROJECT である。(3X4)

英口はかつて研究用大原子炉の計画はしたが、財政的困難でつぶれた。一方 HARWELL LINAC の中性子による凝集体研究の方法は現在世界最高の中性子束を誇る GRENABLE の ILL 炉よりはるかに有カニとが実証され、LINAC の増強更新が決定された。一方 RUTHERFORD LAB. の NIMROD 陽子シンクロトロンはほぼその使命を終つたので有用設備を残して撤去され、その代りに 800 MeV,  $2.5 \times 10^{13}$  P/P, 50 Hz のパルス中性子発生用シンクロトロンを建設することが英口学術会議で合意され、予算要求が政府に提出される段階に近づいてゐる。(1) 既存励磁用電源の確保に IPNS より安いといふが、それでも原子炉を用ひては全然不可能な研究領域の開拓が期待されてゐる。予算は約 70M である。陽子シンクロトロンを利用するこの方法については我口もいひついで進んでゐる。筑波の高エネルギー物理研究所の大加速器の 500 MeV 陽子入射用シンクロトロンはすでに  $3 \times 10^{11}$  P/P のビーマを定常的に出しており測定装置などの建設もほぼ「メ」が立つてゐる。これは ARGONNE や NIMROD より 2 桁ぐらゐり中性子束は低いところだが、時期的にはかなり先行する。(6)

LOS ALAMOS の LAMPF LINAC は建設着手後すでに 10 年近く経つてゐるが束は 100 MA の陽子ビーマで予定の 1/10 に過ぎない。これが所定のビーマに達するまでは疑問に思つてゐる。かりにビーマが出ててもその 1/100 が中性子に利用され、しかもその設備の目的が中性子による兵器の研究となつてゐるので残りの目的は道さない。

最後に DUBNA の IBR 系 パルス中性子設備につき一言つけ加へたい。IBR-30 は  $^{235}\text{U}$  の  $^{235}\text{U}$  塊をパルス的に止めて断片的に超臨界にし、中性子をパルスの形で発生させるもので 1959 年以來稼働しており、歴史は古い。電子リニアックと同期してリニアック + ブースターとすることもできる。この炉心は空冷であるから数 KW 以上の出力は許さぬ。平均 4 MW と言われる IBR-II が建設中であるが、これは  $\text{PuO}_2$  を用ひる。いづれもパルス炉では不可避な 50  $\mu\text{S}$  以上といふ長いパルス中を有し、有用性で加速器によるパルス中性子 ( $\leq 1 \text{ MSEC}$ ) よりはるかに劣ると思ふ。IBR-30 による物理上の成果は今一つ足りない感があり、IBR-II についても私はよくを期待できない。



Progress of the effective thermal neutron flux at the source of beam tubes that can be used for thermal neutron scattering. For steady state sources this is the average flux and for pulsed sources it is the peak flux. & are early sources, @ fission reactors, and ○ pulsed sources.

§2. 既存及び  
建設中の諸設備の性能比較

中性子束を得る諸設備の性能を 図 1 に示す。原子炉はその黎明と共に飛躍的に中性子束強度を増大させたが、次第に飽和に達し  $10^{15}/\text{SEC}\cdot\text{CM}^2$  以上に出ることは炉心熔解等、工学的に基本的困難のため不可能に近い。一方加速器による場合は年代と共にほぼ LOG LINEAR に上昇している。生物分子の構造解析などの今後の重要問題では  $10^{16}/\text{SEC}\cdot\text{CM}^2$  以上の束は必要とし、加速器に頼らざるを得ない。表 1 は FIG 1. の中の代表的な設備につき概略性能をあげたものである。

表 1

設備名	出力	くりかへし	熱中性子束	現況
東北リニアック	e <sup>-</sup> , 250 MeV x 80 mA	110 Hz	$10^{12}/\text{SEC}\cdot\text{CM}^2$	1967 以来稼働中
ZINQ (ARGONNE) p,	500 MeV, $5 \times 10^{12}$ p/p	60 Hz	$10^{15}/$ "	計画切替
IPNS ( " ) p,	800 MeV, $5 \times 10^{13}$ p/p	60 Hz	$10^{16}/$ "	予算要求中
筑波プルスター	p, 500 MeV, $6 \times 10^{11}$ p/p	15 Hz	$10^{14}/$ "	建設中
IBR-II (DUBNA)	4 MW (MEAN POWER)	5 Hz	$10^{16}/$ "	建設中
ILL 原子炉	58 MW STEADY	—	$1.5 \times 10^{15}/$ "	稼働中
NIMROD	p, 0.8 uV GeV, $2.5 \times 10^{13}$ p/p	58 Hz	$5 \times 10^{15}/$ "	検討中

この種の加速器の代表的なものとして IPNS 用大電流シンクロトロン (HIS) の性能を次にあげる。これは 70 MeV の H<sup>-</sup> を LINAC で得て入射と同時に p にストリーマ<sup>7</sup>して 800 MeV まで加速する強収束シンクロトロンで、瞬間電流値は数 10 A に達し、強電流のため発生するかも知らぬ各種の共振の危険がいくゞある。しかしこの抑制はさほど困難ではなく、むしろ加速器工場の祭壇上真珠で飾らるゝものである。従来、電流値をへらしても高エネルギーへと何れ行つた加速器発展の流氷を交えるものゝなる33。

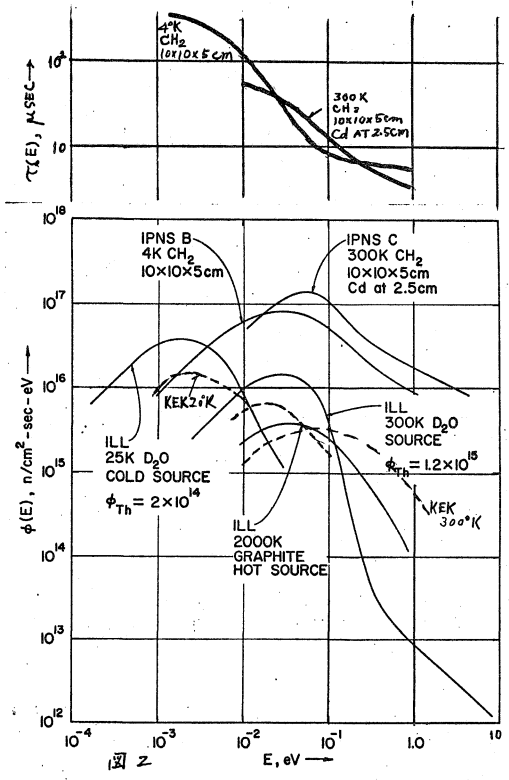
表 2

前段加速器: コックロフト 750 KeV, H <sup>-</sup> , 25 mA	$\beta$ MAX, 水平 11.9 m, 垂直 11.5 m.
リニアック: 加速エネルギー 70 MeV	エミタンス (800 MeV), 水平 $\pi 27.5 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$
RF 200 MHz, 3 空洞, 全長 45 m.	垂直 $\pi 13.8 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$ .
E <sup>-</sup> 4 パルス中 0.9 m SEC, 電子-7-55%	運動量分散 (800 MeV), 0.19 %
E <sup>-</sup> 4 電流 H <sup>-</sup> ~ 15 mA.	Q 電磁石, 32 個, 勾配 ~ 0.5 KG/cm.
エミタンス $\pi 2 \text{ mrad}\cdot\text{cm}$ .	R.F. 高波数 1.72 MHz ~ 3.94 MHz, ハーモニック数 2.
陽子シンクロトロン: 加速エネルギー 800 MeV	平均半径 20.37 m. 偏向曲率 8.1 m.
平均半径 20.37 m. 偏向曲率 8.1 m	衝突構成 OMOFODOMO x 16
磁場構成 OMOFODOMO x 16	$\beta$ -TRON 高波数, 水平 4.25, 垂直 5.25
$\beta$ -TRON 高波数, 水平 4.25, 垂直 5.25	全磁石電力, 1.7 MW.
	E <sup>-</sup> 4 散乱抑制, SEXTUPOLE 電磁石(?)

③ 3. 明日への発展 (医用, 物性物理, 核融合)

メソファクトリーなど医学的利用についてはすでに研究の丁度もなく、一応レーンも敷かかっているが、こゝには述べないこととする。物性への利用は多岐にわたるが、こゝでは大型を必要と

する中性子源用加速器の将来につき今少し述べる。中性子10<sup>9</sup>の発生に伴う発熱は核分裂の場合約200 MeVである。これに対し、核破砕反応では20~60 MeVと少い。熱除去がいつも最終的の問題となる。種の装置の中、精密な寸法と配置を要求される原子炉燃料に比べ、加速器ターゲットは流動液体でもよいので熱除去ははるかに容易である。高速炉で2 MW/l、パルス炉で0.3 MW/lが限度とされている。これに対し、ターゲットから10 MW/lは容易であろう。中性子密度はそれだけ高い。次に熱中性子ないし熱外中性子まで減速するモデレーターは炉心(又はターゲット)の容積が小さい程有利になる。で、最低数、普通は数10 lとる炉心に比較して1 l以下が充分可能なS-Sターゲットの方が有効な熱中性子束を作出せる。熱外中性子束を冷中性子束の発生につては更に別の事情が加わる。即ち通常の熱中性子炉に比べて、ターゲット+モデレーター単やパルス炉+モデレーター系は強いUNDER MODERATIONなので熱中性子束の強度が低い。高く、将来研究上、重要な手段を提供する。さしあえても100~500 meVの領域で圧倒的に有利である。5 meV以下の冷中性子束は大型の含水素モデレーター中で有効に作出せられ、平均寿命が長いため通常が有利になることはたしかになるが、炉心のくせに倍に巨大な極低温設備をおくことの困難性を考えると、核破砕ターゲットの方がライオスタットとの組合はせが容易である。γ-HEATINGがあるので前者では数10 kWの除熱を必要とする。に及し、後者では数Wで足りる。冷中性子パルス中は数100 nSECと長くTOF法の利用が有利でないように見えるが、その速度もおおくと、測定分解能に直接関係するΔt/tは同じととなる。将来のより強い中性子源は加速器が有力となることは明かであろう。図2は現存及び計画中の中性子源の強度及びパルス中(パルス源の場合)の中性子エネルギーの関係として示した。



丸核融合炉は強力なレーザー光線で10<sup>9</sup>SEC程度の短時間高DTを主成分とする固体丸核融合密度を1万倍程度まで圧縮して核融合反応を起させようとするもので、現在100 J(ジュール)くらいのパルスでかなりの中性子発生が見られる。しかし本格的核融合反応を起すには未だ不足で、より強力なレーザー源を得る可能性は小さい。エネルギー的に收支つぐならは合理的な場合でも数千Jの入力が必要とする。レーザー光線は10<sup>-11</sup>SECまで時間成形が可能と有しているが、出力増加はさしあて大へん困難である。中性子入射する方法は巨大な加速器を作らなければならない。現在の技術で実現

可能であるに注目すべきである。

陽子又は重イオンを入射させる場合、次のような利点がある。(1). イオンがおそくるとエネルギー吸収レートを大きくする。(2). RANGEが長くなる。(STRAGGLINGが小さい), RANGEの終端でのエネルギー吸収の割合が大きい。(3) MeVのEJに持つ運動量が大きい。丸薬を圧縮して密度を高める効果が大きい。この方式は1975のACCELERATOR CONFERENCEでARGONNEのR. MARTINによって提唱され、現在 MARTIN, ARNOLDらにより、より具体的な検討が進められている。(6)

1mm以下の小さなDT丸薬の飛散特性時間はいく msec程度であり、KJ以上のイオンビームを4π方向から1 msec程度の同時性で照射する必要がある。又ビームを1mm以下程度に収束させるには強力な収束系を必要とするが、ビームのエミッションが小さいことが望ましい。イオンエネルギーを有効に丸薬に吸収させるための、RANGE-ENERGYの関係から各種イオンに対し必要な加速エネルギーが決まり、相対してRANGEが長くなるように選ぶ必要がある。1mm以下の厚さのAuの皮で包み、RANGEの終りがDT丸薬の中に来るように選ぶ必要がある。MARTINはRANGEにBETHE-ASHKIN流の式を用いて、丸薬が少し高温になるとした場合RANGE式はどの程度か疑問がある。丸薬のサイズ、ビームのエネルギー及び注入されたエネルギー、発生するエネルギー、丸薬の到達密度、温度、放出中性子数など、いろいろ仮定の下に計算出来るが、CLAUSERは光や電子の場合から拡張してのしく計算している。(7) 丸薬を50MeV陽子の場合少しMODIFYで適用すると、10μgのDT丸薬を10KeVt熱して、科学的エネルギー収支バランスの場合4x10<sup>17</sup>/ハールの中性子放射がえられる。IPNSでは10%程度の中性子放射が予定出来るので、パルス中性子源としても期待できる。

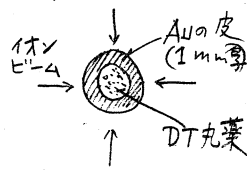


図3

さてこれを実現する加速器としてたとえば右図のようになっている。巨大なストレージリングの高速回転波を用いてイオンを100にBUNCHさせておく。各種の方法で同時にBUNCHを取り出し、あらゆる方向から丸薬ターゲットを導く。BUNCHの時間中は1 msecくらいになっている。10<sup>13</sup>~10<sup>14</sup>というイオン数を入射する。このシンクロトロン→ストレージリングにはH<sup>+</sup>→H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>→α, (HI)<sup>+</sup>→I<sup>+</sup>といったような電荷交換入射で1000回程度の多数イオン入射が必要である。加速イオンとそのエネルギーは、50 MeV p, 200 MeV α などが入射されるが、I<sup>+</sup>を8 GeV (250 MeV/NUCLEON)まで加速し、瞬間的にI<sup>53+</sup>にして取り出すのが必要である。イオンの消滅を防ぐための10<sup>-11</sup> TORRの真空が必要である。図4は、科学的エネルギーバランスを実現し、丸薬プラズマの研究を目的とする設備を想定した時のハローメーターである。明日のパルス中性子源として凝集体研究にも有用である。イオン中性化の問題、電荷交換の方法など技術的に開発しなければならない問題も多く残されている。

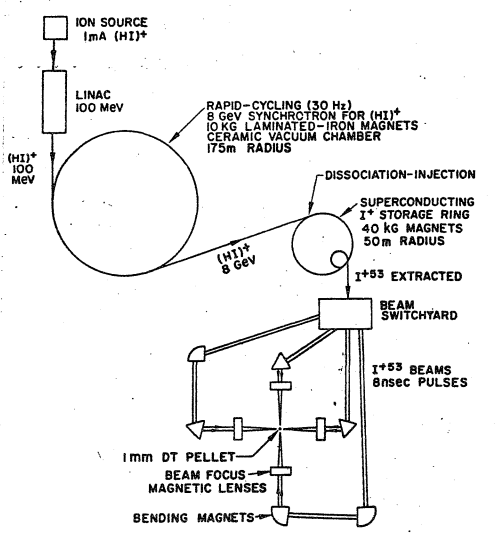


図4

## 文献

- (1) J.M. CARPENTER, G.J. MARMER; EVALUATION OF THE ZGS INJECTOR-BOOSTER AS AN INTENSE NEUTRON GENERATOR, ARGONNE NAT'L LAB. ANL/SSS-72-1 (1972)
- (2) WORKSHOP REPORT, APPLICATION OF A PULSED SPALLATION NEUTRON SOURCE, ARGONNE, ANL-80-32, (1973)
- (3) J.M. CARPENTER, DRAFT PROPOSAL FOR AN INTENSE PULSED NEUTRON SOURCE (IPNS), ARGONNE, (1975)
- (4) WORKSHOP REPORT, USES OF ADVANCED PULSED NEUTRON SOURCES, ARGONNE, ANL-76-10, VOLUME 2, (1975)
- (5) 科研費班報告書「70kV加速器による中性子散乱」代表石川義和 (1975)
- (6) R. L. MARTIN; THE ION BEAM COMPRESSOR FOR PELLET FUSION, PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, WASHINGTON, D.C. (1975), IEEE TRANS. NS-22, 1763 (JUN 1975)  
R. ARNOLD AND R. MARTIN, ION BEAM PELLET FUSION AS A CTR NEUTRON TEST SOURCE, INTERNAT'L CONFERENCE ON RADIATION TEST FACILITIES FOR THE CTR SURFACE AND MATERIALS PROGRAM, ARGONNE, (1975)  
R. L. MARTIN AND R. C. ARNOLD; HEAVY ION ACCELERATORS AND STORAGE RINGS FOR PELLET FUSION REACTORS, SUBM. TO NUCLEAR FUSION, (1976)
- (7) M. J. CLAUSER; ION BEAM IMPLSION OF FUSION TARGET, SAND-75-5562, P.R.L. VOL. 35, No. 13 p. 848. (SEPT. 1975)