

■ 論 説 ■

パルスパワー科学技術の開発とその将来

—高輝度加速器に関する NATO 高等専門家会議 に参加して—

Prospect of the Pulsed Power Science Technology

NATO Advanced Study Institute on High-Brightness Accelerators

上 野 勲 *

Isao Ueno



1. はじめに

パルスパワー技術¹⁾は核融合や加速器燃料増殖炉等の長期エネルギーの開発にとって極めて重要な分野とされており、その技術の現状、問題点および展望についてはすでに本誌に紹介した^{2, 3)}。

今回、NATO高等専門家会議⁴⁾(Advanced Study Institute : ASI) が、パルスパワー技術の開発に強く関連した課題の一つ「高輝度加速器(High-Brightness Accelerators)」を非常に広い角度からとり上げる研究会を開催した。幸いにして、筆者もこれに参加する機会を得たので、この会議における講演、ポスター発表等を通して得た、この分野の科学技術の研究開発の動向について報告する。

この会議は北大西洋条約機構(NATO)の科学委員会が後援するもので、そのプログラムはその時代に大きく問題になってくる課題をとり上げ、ユニークで貴重な公開討論会として1959年来行なわれている。

この会議の目的は英国における個別指導制(tutorial system)を導入した、高度な専門的講演を主体に、質の高い情報交換、意見交換、アイデア・経験の交換の場を提供し、国際的専門家同志の交流を深めさせることにより、研究水準の向上、深化をはかることにある。その会期は通常2週間で、総定員数は最大100名と限定されている。またこの会議録は今日では非常に有名になっている NATO ASI シリーズとして専門分野別に公表されている⁵⁾。

2. 高輝度加速器会議

この会議の目的は空間電荷制限に近くなる大電流ビ

ームの力学、平衡、不安定性等の問題に対する加速器物理、ビーム物理、加速器工学技術と、そして自由電子レーザー²⁾、シンクロトロン放射光源、重イオン²⁾、軽イオン慣性核融合²⁾、加速器燃料増殖炉³⁾等への高輝度ビームの応用にある。

長期エネルギー源の最も有力な候補といわれる核融合と加速器燃料増殖炉、そして電子工業界への広い応用、標準光源、リソグラフィ等に注目を集めている自由電子レーザーとシンクロトロン放射光源、そして更にバクテリア殺菌等の食品加工貯蔵と宇宙用粒子ビーム兵器等の開発は高輝度加速器がその鍵を握っており、それ等を支えているのがパルスパワー科学技術であると考えられる。

そこで、この会議において力点が置かれた自由電子レーザーを例にとりあげ、自由電子レーザーの原理と高輝度加速器との関連を述べる。

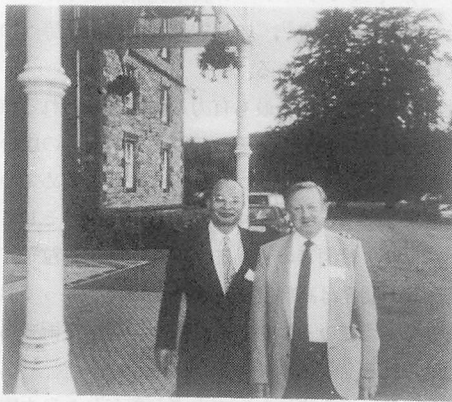
自由電子レーザーは波長可変で単一波長の大出力レーザーとして注目を集めており、そのパルス当たりのエネルギーは30J-150 KJの領域にある。その原理は線形加速器で加速された自由電子ビームを、周期的に振らせる磁場である Wiggler magnet の設置されたレーザー共振器の室内を通すと、自由電子ビームが周期的磁場によって振られ、この振られた時に自由電子が光を放出する。この時、同じ波長の光がくれば、その光が誘導放出によって増幅される。従って、この原理は磁場の強度には関係なく、磁場の周期と電子ビームのエネルギーを可変的にすることによって、誘導放出によるレーザー光の波長を変化させる方式である。エネルギー変換は自由電子のエネルギーを光のエネルギーに変換する方式であって理論的変換効率率は極めて高く約50%ともいわれている。

このような原理に基づいた自由電子レーザー開発の鍵は、良質な特性を持つ自由電子ビームを発生する高輝

* 東京大学工学部強力中性子源開発研究グループ・プロジェクトリーダー



写1 空からの Atholl Palace ホテル



写2 Guenther氏と筆者会議場前

度加速器にある。輝度は単位面積単位立体角当たりのビーム電流値で示しているが、高輝度の定量的表式は研究者により少しずつ相違している。従って本会議の目的の第一は高輝度 (High-Brightness) の定義の数式的・物理的表示方法の審議である。

目的の第二は高輝度加速器の開発の見通しにあり、世界各国で行なわれた関連分野の研究活動をさらえろと共に、広い角度から検討を加え、今後の研究方針を立て、これらをエネルギー資源をめぐる政策的議論に活用しようというものである。

この会議は A. K. Hyder, M. F. Rose, A. H. Guenther の 3 氏の企画および組織化による。

Hyder氏は現在米国アラバマ州立 Auburn 大学物理学科教授、同大学研究部門担当 (副学長代理)、Rose氏も同大学電気工学科の教授 (Space power 研究所長)、Guenther氏は州立テキサス工科大学、州立ニューメキシコ大学の兼任教授で、米国政府科学技術諮問委員会委員長をも勤め、レーザー応用の先駆者と

表1 国別登録参加者数と参加国数

参加者の分類	NATO加盟国 (10ヶ国参加)										小計		
	アメリカ合衆国	イギリス	フランス	西ドイツ	スイス	イタリア	カナダ	トルコ	ベルギー	イスラエル		日本	
組織委員会	6		1	1								8	
講演者	13	3	4	3		1	1					25	
その他参加者 (座長, ポスター発表者)	36	11	4	1	5	2	2	1	2	1		65	
非加盟国招待者											1	1	2
小計	55	14	9	5	5	3	2	2	2	1	1	1	100

して大統領から最高位国民栄誉賞を授与している⁶⁾。

会期は1986年7月13~25日の2週間で、場所は英国スコットランド、パースシア (Perthshire) 地区、ピロクリ (Pitlochry) 町の Atholl Palace ホテルで開催された。

Pitlochry 町は Glasgow から 135 km, Edinburgh から 112 km の距離にあり、Scotland の幾何学的中心に位置する。Atholl Palace ホテルは保養地であるこの町に 6 万坪の土地を森林公園にし、ゴルフ場、プール、ヘリポート等々を設備している (写1と2)。主会議場として使用した Atholl Suite は写真右下円形の建物で、400 席を快適に用意できる広さである。

表1に国別登録参加者数と参加国数を示す。参加国数は12ヶ国で、参加者数は100名、そのうち大半が米国からの専門家であった。

3. プログラム、講演及びポスター発表

プログラムの構成は会議の目的の項で記述したように、概論、加速器物理、ビーム物理、加速器工学、応用から成り立ち、その内容を表2に示す。

尚、この会議に米国経由で出席したが、英国と米国の地方都市間に直交の航空便が数多くあることに驚かされた。これは米英国間の連携の深さを物語っている。

表2 プログラムの構成とその内容

課題	内容	講演時間 (時間)	講演数 (件)	講演者数 (名)	平均講演時間 (時間)
概論		4	4	4	1.5
加速器物理		9	6	6	1.5
ビーム物理		13	7	8	2
加速器工学		5	5	5	1
応用		10	10	10	1
小計		41	32	33	
ポスター発表		3	17	17	1.5

会議第一日目の14日(月)は朝8時半までに会議室 Atholl Suite の座席に着くと、実行委員長 Hyder 氏より開会の挨拶がされ、特別招待者はイスラエルと日本であることが紹介された。続いて実行委員である J. Nation 氏(米国 Cornell 大学教授)より ASI の概論が説明され、両人で30分程の開幕講演がなされた。

座長はそのまま Nation 氏が務め、専門的講演の最初は F. T. Cole 氏(元 Iowa 大学教授, 前 Argonne 国立研究所, 現 Fermi 国立研究所)による, 200 GeV の加速器をデザインしてきた経験を通して、「高輝度加速器の歴史的経緯」について、また二番目は核融合のローソンの条件で特に有名な J. D. Lawson 氏(英国 Rutherford Appleton 研究所教授)による「輝度, エミッタンス, 温度」について, 光学的, 流体力学的, プラズマ物理的原理から出発したビームの光学的特性の優劣を記述する輝度, エミッタンス, 温度に対して, 考えられるすべての点について論及され, 両氏による老熟した素晴らしい概論の講演が行われた。

この日は13時に講演終了後昼食をとり午後の自由時間を挟んで再び18時半よりパーティが催され, 第1日目のプログラムが終了した。なお, 食事のテーブルは形や大きさが色々で, 朝昼晩と1日3回, 2週間, その都度どのテーブルに着くか決まっていない。従って, 毎回テーブルを囲むメンバーは異なり, 毎回自己紹介をしあって, 参加者同志が知り合いになり, 会議が終了するころには殆どの参加者同志がお互いに挨拶をかわし, 自然に話し合う間柄になった。このように同じ屋根の下で寝食を共にして, 2週間を過ごすので, 短期間に人間関係が芽生え, 成熟し, ASI の目的を達成させることが可能になった。

以上のような毎日のスケジュールにより, 講演は2週間の内10日間に亘って, 広い角度から32件, 活発な議論を伴って行なわれたので, その要点を纏めるだけでもかなりの枚数になる。従って, ここでは特に応用に関する講演のみ, 表題とその講演者並びにその内容に少し触れて紹介し, その他は最後に付録として, 表題とその講演者を紹介するだけにとどめ, 長期エネルギー問題を考える上での参考に供したい。

第8~10日目の会議(応用)は座長 C. Pidgeon 氏(地元 Heriot-Watt 大学教授)のもとで, 取り纏めの講演を含めて9件(3日間)が行われた。講演の順に表題とその講演者を以下に示す。

- (1) 「誘導ライナックによる自由電子レーザーの励起」米国 Lawrence Livermore 国立研究所, V. Neil 氏

- (2) 「自由電子レーザー特性」伊国 Enea Frascati センター, レーザ研究所 E. Sabia 氏

- (3) 「Kelvin 研究所の自由電子レーザー実験」英国 Kelvin 研究所長で Glasgow 大学教授, J. Reid 氏

- (4) 「Orsay 蓄積リング自由電子レーザー」仏国 Saclay 原子核研究センター P. Elleaume 氏

- (5) 「エミッタンス, 輝度と自由電子レーザービーム特性」米国海軍研究所本省物理部門科学官 C. W. Robertson 氏

上記の自由電子レーザーに関する講演は(1)でライナック自由電子レーザーの概論を, (2)~(4)で各国, 各研究所の第一線の研究者によって, もっか進行中の自由電子レーザーの詳細な報告とその議論を, 更に(5)ではビーム特性に大きく依存する自由電子レーザーの分散式, 効率, 生長率に対して議論し, 結局ビーム特性はエミッタンス, 輝度等の因子に依存するので, 自由電子レーザーの開発の成功は加速器で決まると結んでいる。

- (6) 「重イオン核融合用線形加速器」米国 Lawrence Berkley 研究所 D. Keefe 氏

本講演は重イオン用ドライバー方式として, 誘導ライナックを最初に提案し, 自らの加速器研究グループでこれを取り上げ, 一躍世界の檜舞台に上がり, 注目を浴びているテーマを当の博士より報告がなされた。その内容は主として, 一定電流高周波ライナック方式と新形誘導ライナック方式による比較, 概念設計並びに研究の進行状況等であった。

- (7) 「シンクロトロン放射装置」仏国パリ大学-XI, 教授 M. P. Petroff 氏

本講演は X 線レーザーの開発に対して, 計算機シミュレーションによる色々なアイデアの検討と解説がなされた。

- (8) 「食品加工貯蔵用平均高出力電子線加速器」米国 New-Mexico 大学教授 S. Humphries Jr. 氏(加速器とプラズマビーム技術研究所の所長, “Principles of Charged Particle Acceleration” “Advances in Charged Particle Optics” の著者)。

本講演は食品加工貯蔵用への加速器応用の概観で, 例えばベーコン, ハム, エビ, カニ等々のバクテリア殺菌等に対する放射性同位元素法に比較した定量的な値を示し, 加工貯蔵のコスト, 人体への安全性, 健康的, 食品衛生面から加速器法のメリットを強調し, 過去10年間の急激なこの分野の発展を解説し, 設計仕様を3器種のライナックである, 連続高周波, 高周波磁気スイッチ誘導, 長パルス誘導等のライナックに対し



写3 コーヒーブレイクの1コマ

て検討した結果を示した。

ポスター発表は写1に見た大きな円形の会議場の館内の周囲に期間中セットされ、展示されたので、非常に活発な議論が開期中続けられ、アイデアの交換の場所として提供された(写3)。その内容は新しい高輝度加速器のアイデアから、線形誘導加速器、プラズマフォークラスイオン加速器等の各種加速器と、それら周辺に関係あるシミュレーション結果や実験結果が合計17件ポスターセッションで公表された(写4)。

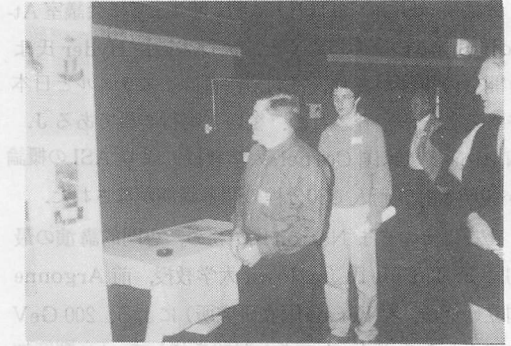
最終日7月25日(金)の最後の講演は取り纏めの講演として、米国海軍研究所本省 C. W. Roberson氏によって締め括られた。

これは会議全体の講演に対して論評を加えて、中でも特に高輝度の定義に関しては重点を置き、講演者がそれぞれ提示した高輝度の定義を拾い上げ、又文献等に記載されているものをも含めて、数式による定義を自ら手書きしオーバーヘッドにより示した。そして一式ずつ解説と論評を加え、それらの共通性を拾い上げて、落ち着くべき式を三式に絞って披露し、締め括った。

この後、本会議の実行委員長の一人である Rose 氏より総評として、必ずしも歯切れは良くなかったが、高輝度加速器の開発の見通しは難問を多く抱えているので、今後の専門家の研究努力におおいに依存するが展望は開かれていると宣言され会議を閉じた。

4. ASIバンケット

ASIの祝賀宴会は Andrw 王子殿下と Sarah Ferguson 嬢の婚礼祝賀会とを兼ねて、NATO 並びに英国王室からの正式な招宴として、7月23日(水)夕刻よりブライア城(Blaie Castle)で開催された。この城は会議場から北へ12kmに位置し、自然の要塞で囲まれている場所に1255年、Atholl公爵が居城として建てた



写4 Rose氏とポスター会場

もので、現在9、10代目の公爵がおられる。

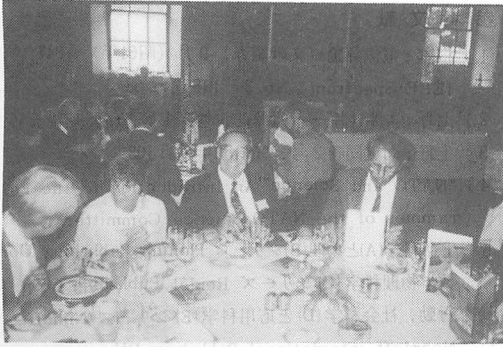
この城には、英国諸島で唯一人私兵を持つことを許された公爵が当時使っていた32の部屋がある。参加者は会議場のホテルからバスに分乗して城に着くと、典型的な Scotland 兵姿の儀仗兵による出迎えを受け、その儀仗兵による軍楽隊のパレードを見物した後、城の前で全員による記念撮影をすませ城中に通される。広大な舞踏室には十人掛けの円形テーブルが参加者人数分だけ用意されており、各自の好みによって各テーブルが埋められた。

筆者のテーブルは米国の専門誌「粒子加速器」の編集委員で Lawrence Berkeley 研究所の D. Keefe 氏、Fermi 研究所の F. Cole 氏、両夫妻と、Scotland の正式な衣装姿の Atholl Palace ホテル支配人夫妻、西独 Frankfurt 大学の H. Klein 教授、Sandia 国立研究所パルスパワー応用部の部長で、エネルギー、国防省の顧問をされている K. R. Prestwich 氏と、米国 Texas 工科大学 A. Donaldson 教授で囲まれた(写5)。

欧米における通常の大きなバンケットは挨拶もなく、始まりも、終わりも自然のままという大変にあっさりしたものであるが、本バンケットは Andrew 王子殿下の婚礼祝賀会を兼ねていたので、実行委員による音頭取りで三つの祝杯、即ち、忠誠(Loyal Toast)への、Andrew 王子殿下、妃殿下への、そして NATO 加盟諸国の頭首への祝杯が行われた。しかし、その後は一切の拘束はなく欧米特有の気楽な自然のままの社交会が続いた。ネス湖(写6)に代表する緯度の高い Scotland の夏の夜の訪れは極めて遅く、周囲が薄暗くなり始めるのは23時頃であった。

5. おわりに

この分野の最近の会議は1985年度 IEEE 粒子加速器会議(1985年5月、カナダ Vancouver)、イオン入射



写5 招待宴の1コマ

器研究会 (1985年5月, 米国 San Diego), IEEE パルスパワー会議 (1985年6月, 米国 Arlington), 大強度粒子ビームの開発と応用に関する第2回国際シンポジウム (1986年6月, 日本, 長岡) 等に大小の関連会議が開催されて来ている。

今回 ASI の目的をつぶさに経験する機会に恵まれ, 世界の高輝度加速器の開発の現状と問題点がなんであるかを知り得たと同時に, 又新たな友人と知り合い, 貴重な経験をした事は極めて有意義であった。

以上 NATO 高輝度加速器 ASI のあらましを中心に, 最近の動向を紹介した。本稿が参加されなかった会員各位をはじめ, 関係各位に少しでも役立てば幸いである。更に, 詳細な専門的学術的内容を知りたい各位に対し近月中に NATO ASI シリーズとして, 本会議の proceedings が出版されることを再度付記する。

附録

第2～3日目の会議 (加速器物理)

座長 T. Teich 氏 (スイス国立技術研究所, 高電圧物理グループリーダー)

(1) 大強度円型陽子加速器

M. Craddock 氏 (カナダ, British Columbia 大学物理学教授, TRIUMF 加速器研究部部長, 1985年度 IEEE 粒子加速器会議主催, 実行委員長)

(2) 円型加速器

N. Rostoker 氏 (米国, California 大学 Irvine 校, 物理学教授, 物理学会 fellow, 同学会プラズマ物理部門元委員長)

(3) 航跡場 (wake field) 加速器: 概念と加速器,

P. B. Wilson 氏 (米国, Stanford 大学線形加速器センター教授)

(4) 航跡場の限界と可能性

R. K. Cooper 氏 (米国, Los Alamos 国立研究



写6 ネス湖

所, 加速器理論とシミュレーショングループリーダー)
(5) 大強度高周波線形加速器

R. A. Jameson 氏 (米国, Los Alamos 国立研究所加速器技術部部長, 同部は加速器開発の総括的特権をもたされ, 物理研究, 核融合, 医療, 国防に対する加速器応用の継続したプログラムを常にもっている。)

(6) 新型加速器の概念

D. Keefe 氏 (米国, Lawrence Berkeley 研究所, 加速器グループリーダー)

第3～6日目の会議 (ビーム物理)

座長 H. Doucet 氏 (仏国, Ecole 工芸専門大学教授, 本会議組織委員)

(1) 計算機シミュレーションコードの中にある物理過程

R. K. Cooper 氏 (加速器物理の(4)参照)

(2) 円形加速器中の大電流電子の伝播

B. Godfrey 氏 (米国, Mission 研究所, プラズマ科学部部長)

(3) 線形誘導加速器中の大電流ビームの輸送

R. B. Miller 氏 (米国, Sandia 国立研究所, 粒子ビーム, レーザ等の指向性エネルギー研究部部長)

(4) ミリ波とサブミリ波の発生

J. M. Buzzi 氏 (仏国, Milieux 電離物理研究所)

(5) イオン源に対する輝度の限界

R. Keller 氏 (西独, GSI)

(6) 円形加速器と蓄積リングにおけるビーム電流の限界

J. L. Laclare 氏 (仏国, 欧州シンクロトロン放射施設 Grenoble の計画責任者)

(7) 入射装置と線源

T. S. Green 氏 (英国, Culham 研究所, 粒子ビーム開発グループリーダー)

第6～7日目の会議 (加速器工学)

座長 W. Schmidt 氏 (西独, Karlsruhe 原子核研究センター-米国事務所科学官, 本会議組織委員)

- (1) 線形誘導加速器の工学面
V. Neil氏 (Lawrence Livermore米国立研究所)
- (2) 大電流加速器のパルスパワー
K. R. Prestwich氏 (米國, Sandia 国立研究所パ
ルスパワー応用部部長)
- (3) 高周波四重極構造の工学
H. Koein氏 (西独 Frankfurt大学教授, 理学部長)
- (4) 高周波構造における電界の限界
R. A. Jameson氏 (加速器物理の(5)参照)
- (5) 高輝度加速器用超電導空洞の基本的特徴
G. Müller氏 (西独, Wuppertal大学)

参考文献

- 1) 根本; 電気評論 (文献紹介) 9月 (昭61年) 頁847
IEEE Spectrum No.3 (1985) p.68
- 2) 上野; エネルギー・資源, 5巻, 1号, (昭59年) 頁16
- 3) 上野; 同上同巻2号, (昭59年) 頁103
- 4) "NATO and Science" An Introduction to the Pro-
grammes of the NATO Science Committee
- 5) 生命科学(A)と物理(B)シリーズ Plenum Publishing Corp.,
数学物理科学(C)シリーズ Reidel Publishing Corp.,
行動, 社会科学(D)と応用科学(E)シリーズ Nijhoff /
Noordoff international Publishers BV.
- 6) R. Cunningham; Laser & Applications, No.12
(1986) pp. 63-68

協賛行事

第3回触媒燃焼に関するシンポジウム

主催 触媒学会

協賛 日本化学会, 石油学会, 窯業学会, 燃料協会, 日本燃焼研究会, エネルギー・資源研究会

日時 昭和62年5月29日(金) 10時~16時

会場 東京大学工学部(文京区本郷7-3-1)

プログラム

- | | | |
|---------------------------|---------|--------|
| 1. 低温触媒燃焼バーナー——燃焼特性と応用の現状 | (大阪ガス) | 貞森 博己氏 |
| 2. ガスタービンへの触媒燃焼の応用 | (東芝総研) | 肥塚 淳次氏 |
| 3. 高温触媒燃焼反応における触媒材料 | (九大総理工) | 荒井 弘通氏 |
| 4. 触媒燃焼に関する熱流体化学的研究の動向 | (東大工) | 平野 敏右氏 |

参加賞 (資料代を含む) 当日会場で申し受けます。

会員5,000円, 学生1,000円, 非会員7,000円

世話人 御園生誠(東大), 乾 智行(京大), 荒井弘通(九大), 福沢 久(電力中研),
松田臣平(日立日研)

連絡先 〒113 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学工学部

御園生 誠 Tel.03-812-2111 内線7272