

## 大型加速器と小型加速器

「小型加速器 40 年の保守」  
— つまらないことに喜びを感じながらのテクニシャン —  
— リニアック技術研究会の皆さんに感謝 —

高見 清\*

## Maintenance of KURRI-LINAC for 40 Years

Kiyoshi TAKAMI\*

## Abstract

This report presents the present status of 46 MeV electron linear accelerator (linac) of the Research Reactor Institute, Kyoto University (KURRI) and also reviews how the linac has been successfully used/operated for 40 years. Precious experiences in the linac maintenance are introduced: how to solve the overload of klystron modulator, development of a fast pulser for an electron gun, and how to make the maintenance effective.

## 1. はじめに

本学会誌の創刊号で「国内の加速器施設」を北から西に紹介されているが、なぜか宇治にある京大化研よりも京都大学原子炉実験所の「中性子発生装置（電子線形加速器）」（以下京大炉ライナック）が先に紹介されている。場所は大阪の南、関西空港の近くである。

原子炉実験所では、現在、FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉開発を進めていて加速器利用が今後の実験所研究の大きな柱になりつつある。一方、当実験所では 40 年近く前の 1965 年に「中性子発生装置（電子線形加速器）」（以下京大炉ライナック）が設置され、これまで数多くの研究者に利用されている。また、1978 年には D-T 反応を使った加速器（14 MeV 中性子源）が臨界集合体に付設されている。こ

こでは古くて小さい京大炉ライナックの保守を紹介する。下欄に新旧の担当者を示す。40 年近く携わった一技術職員から見た「大学の小型加速器」である。

## 2. 利用状況と運転時間

京大炉ライナックは加速周波数が 1,300 MHz (L バンド) である。表 1 に簡単な沿革と表 2 に主な性能を示す。

京大炉ライナックは当初、定常の中性子源である原子炉と相補するパルス状中性子源として導入され、炉物理実験に利用された。中性子実験の目的は 1975 年頃から核データの測定に変わった。1990 年から鉛スペクトロメータの設置、外部からのコヒーレント放射光実験、陽電子生成実験、所内のパラメトリック X 線実験と利用方法の多様化が進み運転時間も増加し

\*\*\*\*\*

現在のライナック担当者とは旧担当者 (a: 旧保守担当者, b: 現保守担当者)

施設責任者 中島 健

教員 高橋俊晴, 窪田卓見, 堀 順一, <sup>a</sup>山本修二

技術職員 <sup>b</sup>阿部尚也 ('03 採用), <sup>b</sup>高見 清

旧担当者 小林捷平\*, 藤田薫顕\*, <sup>a</sup>木村康洋, <sup>a</sup>小塚敏彦, <sup>a</sup>杉本正明, <sup>a</sup>西本和男\*\*, 柴田俊一

現所属: \*近畿大学, \*\*三菱重工プラント建設

\*\*\*\*\*

\* 京都大学原子炉実験所 中性子発生装置室 (技術室) Research Reactor Institute, Kyoto University  
(E-mail: takami@rri.kyoto-u.ac.jp)

た。

図1に完成から昨年までの低圧とビームのON時間の変化を示す。設置後、40年になろうとしているが最近の10年はそれまでよりも多く使われていることが分かる。この装置はシングルユーザマシンで実験

準備や片付の日を含めた利用日数は年間約200日である。多様化が始まった1991年に文部省(当時)からの維持費が半減し、過去最高の運転時間を記録した1997年に文部省からの予算は無くなったが、所内措置で運転を継続している。

古い実験装置だが、今も多くのユーザが存在する。30 MeVクラスで大電流という特徴は国内外に無い貴重な存在とも聞く。現在の利用形態は次のように分類できる。

① 電子線照射

鉄、合金、半導体の材料照射で、オゾン爆発の危険から他施設では実施されていない液体窒素温度での照射実験も長く続いている。研究炉の休止問題などからユーザが増えようとしている。

② X線による同位体製造

X線を試料に当て( $\gamma, p$ ), ( $\gamma, n$ ) 反応によって原子炉で選択的に製造し難いRIを製造できる。現在は環境中のプルトニウムの回収率を求めるための同位体製造の研究が行われている。

③ コヒーレント放射光実験

分光光源として利用するための専用装置が設置されている京大炉ライナックは、赤外分光研究にとって貴重な存在になり、近年ユーザも増えている。この10年で中性子実験と並ぶ京大炉ライナック利用の大きな柱になっている。

④ 中性子実験

鉛スペクトロメータやTOF法による中性子核データ測定が行われて来た。平成14年度の文部科学省の「革新的原子力システム技術開発公募」で採択された

表1 沿革

• 1965年	米国 High Voltage Engineering (ARCO) 社製 L-1512-G 型 (23 MeV) 電子線型加速器を導入
• 1968年	全国共同利用開始
• 1971~72年	加速管・マイクロ波発生装置の増設(部品購入で担当者による組立て)
• 1973年	大型電子銃 Model 12 に交換
• 1997年	文部省からの維持費が無くなり、所内の予算措置で運転継続

表2 主な性能

ビームエネルギー	
• 最高エネルギー	46 MeV
• 最大電力エネルギー	30 MeV (4 $\mu$ S, 500 mA)
ビーム電流	
• ロングパルス	500 mA (~4 $\mu$ )
• ショートパルス	2~6 A (10~100 ns)
最大ビーム電力	
パルス繰返し数	~6 kW
• ショートパルス	シングル ~300 pps
• ロングパルス	シングル ~100 pps

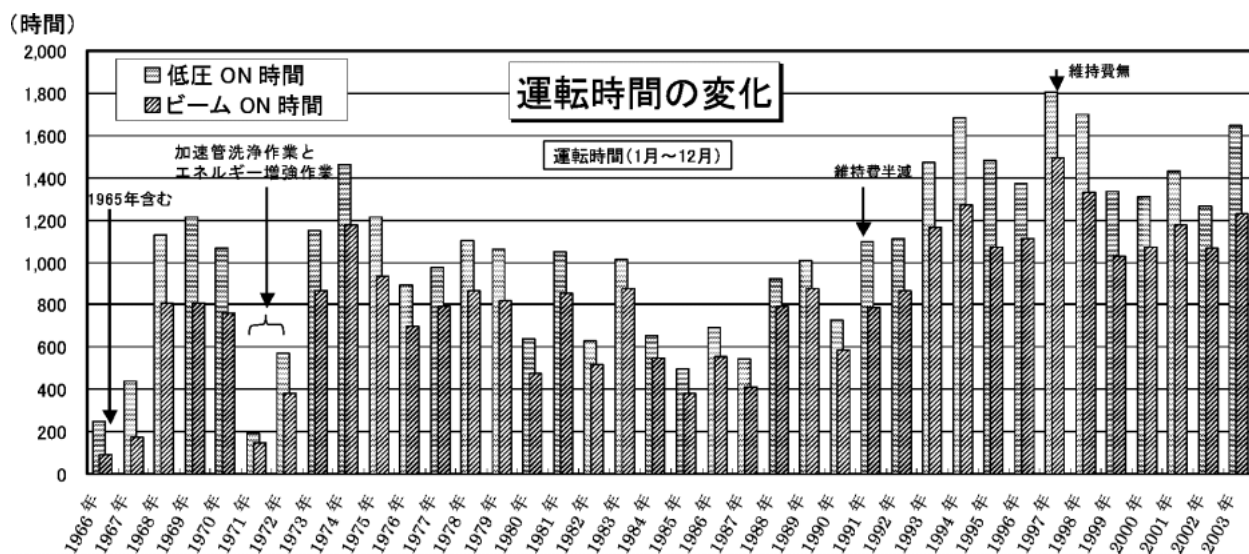


図1 京大炉ライナックの運転時間の変化

「高度放射線測定技術による革新炉用核データに関する研究開発」のグループが精力的なユーザとなって実験が行われている。

### 3. 保 守

これまでの保守から私が比較的長く取組んだクライストロン・モデレータ及び電子銃駆動用パルスと近年の保守について紹介する。

#### 3.1 クライストロン・モデレータ（サイラトロンの連続放電を中心に）

電子ライナックは加速管にパルス状の大電力マイクロ波を加えて電子を加速する。このマイクロ波を大型クライストロンで発生させる。このクライストロンに大電力パルスを供給するのがモデレータ（変調器）である。京大炉ライナックのパルスのピーク・パワーは $\sim 30 \text{ MW} \times 2$  台である。パルスの発生は伝送線を模擬した多段のコンデンサとコイルに $\sim 30 \text{ kV}$  の直流電圧を貯め、水素サイラトロン（放電管）でスイッチ ON することで矩形波のパルスを得る。 $\sim 2,400 \text{ A}$  のパルス電流が流れる。サイラトロンには OFF する能力が無く、周辺回路の応答で OFF させる。このパルス後、サイラトロンを OFF できない現象（連続放電）が起きると  $15 \text{ kV}$  の直流電源がショート状態になって過電流が流れてマシンが止まる。

##### 3.1.1 最初の製作（1971～72年）

エネルギー増強の予算はおりたが、米国加速器メーカーに依頼すると加速管の増設だけになって期待した増強にならないために部品を購入して我々で製作することになった。

回路動作も十分判らず、他所に見学に行き、「共振充電も知らないの？」と言われたのを今も覚えている。横に購入当初のモデレータはあったが、そのまま作ろうとせずに水銀整流器や 2 極真空管をシリコン整流器に置き換え、クライストロンの収束コイルは磁束を測定してコイル位置と電流・巻数を指定して国内のトランスメーカーに発注、その電源はトランスレスのスライダックを使った非安定電源を製作した。確かに寿命の問題（交換作業）から開放されたが、真空管とシリコン整流器との特性の違いが判らず、抵抗器が燃えた。空気の流れない整流器のフィンも作った。あの知識でよく作る気になったと思う。低いパワーでの運転であったが多くの経験と自信を得た。

##### 3.1.2 クライストロンのメーカー変更に伴う改造（1982～00年）

それまで使っていた米国 Litton 社製クライストロンが年々高額化し、仏国トムソン CSF（現 Thales）

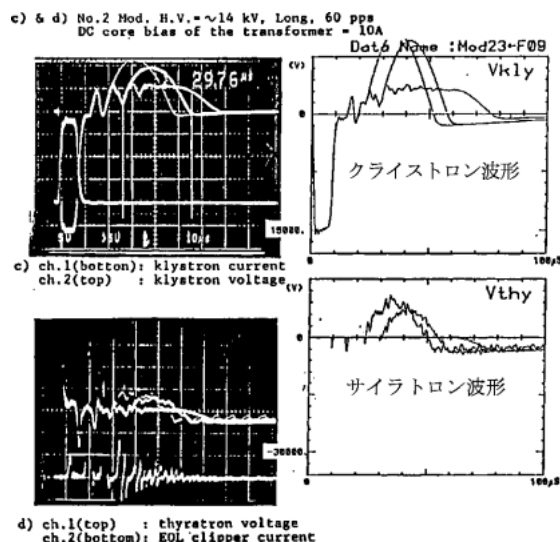


図2 実際の波形（オシロコップ：左）とシミュレーション波形（：右）の比較

社製に変更することにしたが、この機会に高出力にしたいと考え、『THE STANFORD TWO-MAILE ACCELERATOR』のモデレータを真似てポジティブミスマッチや EOL クリッパ回路を採用した。また、パソコンが出てきた頃で Basic での回路シミュレーション（数値計算）に取り組んだ。計算式の基本は当時のリーダ藤田講師（当時）に教わり、より現実の回路に近づけながらプログラムを拡張した。図2はサイラトロンの再導通現象が不安定な状態の実際の波形（オシロ）であるが、右側はこれを模して計算した波形である。シミュレーションでパルストランスの励磁電流の働きを知ったし、他の回路動作の理解も深めた。また、各抵抗器の必要電力なども計算でき、設計している気にもなった。

モデレータの出力は上がったが、時々起こるサイラトロンの連続放電から逃れられず、種々試みたが大きな進展のないまま、最近まで来た。

##### 3.1.3 冷却方式の変更（2001年）

サイラトロン（F241）メーカーが推奨する冷却方式に改造した。その後、極めて安定になった。改造前にはここまで良くなると予想できなかった。横から冷やしていたサイラトロンを単に下からの冷却にただけである。多い日には1日数回以上起こっていたサイラトロンの連続放電によるマシン停止が、1年に2・3度になった。実験によってパルス繰返し数を  $10 \sim 300 \text{ Hz}$  に変えるが、リザーバ電圧（サイラトロン内の水素ガス圧を調整する）の調整（直流安定化電源使用）も行っていない。冷却の大切さを知らされた。サ

イラトロンの寿命も長くなると期待している。マシン停止の問題がなくなったので昨年から DeQing 回路（伝送線に充電する電圧の安定化回路）を付けて世間並みのパルス安定度にした。この回路は最高パルス繰返し数を落とさないためにコンデンサ・クリップ方式を採用している。

### 3.2 電子銃駆動用高速パルスの開発

電子銃はライナックの加速電子を発生させるもので、これに加える直流高電圧電源やパルスをインジェクタ電源と呼び、カソードにパルスを加える回路を電子銃駆動用パルスと呼んでいる。1973年の電流増強で大型電子銃（Model 12）にしたが、古いインジェクタ電源を使っていたので電子銃の能力（ $\sim 20$  A）を発揮できないでいた。（短パルスで、1.5 A が 2.5 A ビームになっただけ。）

#### 3.2.1 電子銃インジェクタ電源の更新（1980年）

古いインジェクタ電源に使っていたモータ・ジェネレータの振動によるトラブルが多発し、国内メーカに製作依頼したが当時国内ではマイクロ波用真空管（Power Grid Tube）を使ったパルス増幅器の製作経験が無く、輸入した他大学のマシンなどを参考に回路方式を決めた。しかし、仕様の立上がり時間 5 ns (2 kV, 40 A) には至らず、メーカから 7 ns で手を打てないか相談された。納期を諦めて職場で試作し、メーカに出向いて現場の人と相談しながら改造して目標性能 5 ns にした。納期は半年以上遅れた。ビーム電流は 2.5 A から  $\sim 6$  A になった。導入後、何箇所か自分で手直しをして今も使っている。近年、老朽化してトラブルが増え、更新が急がれる。

#### 3.2.2 アバランシェ・パルスの開発（1990～97年）

所内に要求は無かったが、アバランシェ・パルスの開発に取組んだ。アバランシェ・パルスは、当時、世界一速いとされた電子銃（Koontz SLAC）で使われていた。アバランシェ・パルスは、トランジスタを特殊なスイッチング・モードで使うもので、高速で大振幅が得られる。導入当初のインジェクタ電源の初段にも使っていたので興味を持っていた。私がモデレータに忙しい頃、リニアック技術研究会で盛んにアバランシェ・パルスが報告されていた。しばらくして弥生（東大工学研究科原子力工学研究施設）の方からイギリスメーカ（Kentech Instruments）が振幅 1 kV で立上がり時間 100 ps のアバランシェ・パルスの売込みに来たこと知らされた。それを聞いて私も作れると思ったが、他の方は取組みを止めた。その後、6年間ほど研究会毎に改善したパルスを発表し続けて立上がり時間 100 ps, 1 kV, 20 A のパルス（図 3）が一応でき

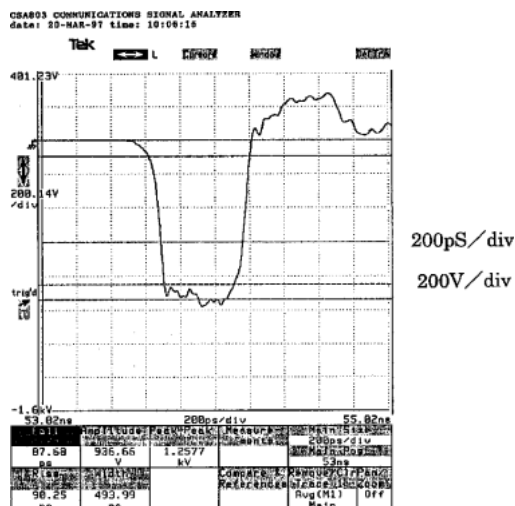


図 3 製作したアバランシェ・パルスの出力波形

た（未発表）。製作費用をもらっていたので SPring-8 に納めた。しかし、このパルスを必要とした SPring-8 のリングでは陽電子を回す必要がなくなり、不要になった。最近、京大炉ライナックへの導入を目指して試作しているが思うように行かずこぼっている。先のアバランシェ・パルスのスイッチング速度は電流で  $2 \times 10^5$  A/ $\mu$ sec, 電圧で  $10^7$  V/ $\mu$ sec である。大型サイラトロンで  $10^4$  A/ $\mu$ sec である。勿論、パワーに限界はあるが電子銃パルス用素子としての魅力は今も持っている。しかし、メーカが現れたからか、楽しむ人は少なくなった。

### 3.3 近年の保守

近年の保守は気持の上でかなり変わった。

#### 3.3.1 1994年からの体制（人員配置）の変化

1994年春まで技術職員は4名いて全員が研究炉（優先）との兼務で他の研究炉部員と明確な差が無かった。しかし、2人が研究炉専任になり、私は研究炉の保守を免除された。それまでは気楽に構えていられたが、一人では怖くて赤信号が渡れなくなった。自ら進んでしたことのない掃除もするようになった。残るもう1人も1昨年には、研究炉以外の仕事も加わり、よほど人手が必要な場合でもない限り頼めなくなった。私の定年後はマシンを止めると思っていたら、昨春、採用した新人をライナックに配属した。残り時間が少なく継承する自信がない。私自身走りながらの引継ぎなのでバトンタッチといっている。これまで教育されても育てることなぞ考えたことの無い人間である。

#### 3.3.2 仕事量の増加

3人の仕事が入ってきた。加えて施設責任者が研究

炉部長などになり、その仕事も入ってきた。RI 施設としての変更（ターゲット室の非密封 RI 取扱施設化）などの雑務、共同利用者や担当者への教育、予算の要求書作成から執行、放射線エリアモニタの管理・較正などもある。

### 3.3.3 トラブル・故障の増加

1990 年頃のトラブルは先に書いたクライストロン・モジュレータのサイクロンの連続放電に絡む対応と RF ドライバー（クライストロン励振系）のマイクロ波用真空管の交換が目立つ作業で他の故障は少ない。真空管の交換回数が増えていたが、その原因を最近の真空管は品質が落ちたからだと思っていた。失敗談である。'97 年に RF ドライバーに使っていた安定化トランス（鉄共振型）の唸り音がかなり激しくなって交換した。真空管の交換が一巡した後、交換回数が 3 分の 1 になった。トランスの振動が真空管の寿命を縮めていたのである。

表 2 の性能では最大ビーム電力を 6 kW（平均電流 200  $\mu$ A）としているが現在、6 kW で連続運転できない。昨春、ビーム電力 6 kW の長時間連続運転が計画され、40 時間足らず運転後、実験の都合で一旦停止した。その直後、真空漏れが生じて全てのイオンポンプが停止した。これはこぼれた電子ビームがビームダクトを加熱させ、止めた直後に温度が下がり、メタルガasket から漏れたものである。その後、漏れたフランジや加熱されたパイプに熱電対を付け、75°C（数値に根拠はない）を越えるとマシンが止まるようにした。事故後、ビーム取出し用チタン窓（30  $\mu$ m 厚サ）も変形していた。これも怖い現象で急遽ブローで強制冷却している。ビームダクトの温度センサーが働いて今は  $\sim$ 3 kW の連続運転が限界である。電子銃更新で改善できると期待している。ビーム窓の限界はカメラによる監視を計画している。京大炉ライナックの存在価値を高めるためにハイパワー化を望んでいたが慎重になった。今はパワーを落として時間で稼いでもらった方がマシンにもユーザにも良いと思っている。このトラブルでそれまで 20 年以上、マシンが壊れても 24 時間以内に復旧させ、外からのユーザに実験をあきらめてもらったことがないという内心の誇りが消えた。

2000 年頃から古い装置のマイクロスイッチなどの接触不良や高圧回路の絶縁材（ベークライトなど）の劣化によるトラブルが増えている。また、製造中止となった部品も多い。次々にトラブルが発生し、まるでもぐら（トラブル）叩きをしているようである。日常的な保守や点検は被害を最小限にして安定に利用するために重要と考えるようになった。現在は異常時にマ

シンを止めるためのインターロック整備を心掛けている。

## 4. 運転経費とマンパワー

京大炉ライナックで使ったお金から運転経費を、外注からマンパワーのコストを考えてみた。

### 4.1 運転経費

1964 年度の装置購入価格は約 1 億 2 千万円である。かなり安いと思われそうであるが私の月収が 1 万 2 千円位の頃である。加速管・マイクロ波発生装置の増設及び電子銃の大型化に合計約 6 千 2 百万円かけた。年間の維持費が設備費の約 10% であった。今までにこの装置にかけた費用は約 7 億円に上る。このうちの約 4 分の 1 がクライストロンの購入価格である。今年度中には、累計ビーム ON 時間が 32,000 時間を超えらると思えるので単純計算では 2 万 2 千円/時間となる。一方、初期投資などを含めない純粋な維持費は、現在のところ、7 千円  $\sim$  7 千 5 百円/時間である。

### 4.2 人件費とマンパワー

加速器の運転・保守を引受ける会社の方がどう間違えられたか私に売り込みに来て外注の方が安いと言われた。最近、興味を持って外注している他研究所の話を費用も含めて伺った。伺った範囲の話だが 1 千万（年額）から倍以上までである。運転保守を全面的に任せているところから外注の方々の教育・マネジメントまでマシン担当の研究者がされているところ（かなりのエネルギーと推察）までであった。よく働くという評価だ。私の周りの方も使いにくい年寄りより外注がいいと思うだろう。守衛さんや清掃の外注で支払う金額を聞いて愕然としたことがあるが加速器の外注は高額である。加速器の外注はお金があっても十分な教育をする余裕のない施設だけができるように思える。

京大炉ライナックでは 10 年ほど前まで研究炉部員を兼務で使っていたので人件費はほぼゼロだった。昨年、研究炉の運転業務はあるが新人の技術職員を入れ、今夏、私をほぼ専属にした。今は人件費がかかっている。中性子実験の教員も入ったので「小さな実験装置に人が多い」と言われた先生もいる。しかし、もぐら叩き（トラブル潰し）が続く古いマシンをユーザである研究者だけではとても動かせると思えない。年間運転時間が 1,000  $\sim$  1,200 時間である。壊れても修理の依頼先がなく自分達で修理する。保守の週や日が無く利用の合間に行う作業である。新人の研究者は研究の立ち上げに精一杯である。

育てる必要はあるが加速器は外注よりも職員の方が

安い。もし、動かし続けるなら1人保守も避けるべきで、その人がいなくなると停るし、1人の仕事は作業能率が悪く、高電圧の多い加速器では安全上の配慮もいる。その仕事が不要になった時の行き先を兼務で確保しておけば、決して無駄な人材にならない。

## 5. ライナックでの40年を振り返る

導入時の国内のマシンよりも先進的ではあったが当初からよく壊れた。米国製でメーカーに来てもらえない。みんなでばらして何とか修理した。数年間は故障修理に藤田助手（当時）も参加したが、エネルギー増強作業の後、段々技術職員で面倒を見るようになった。当時の指導者はよくあの素人集団に改造を任せた。今ではやらせる人もやろうという人もいないような気がする。モジュレータに至っては30年を要している。

3. 保守3.1, 3.2は4人体制の中でできたことである。私自身4人体制の中で追求を楽しませて貰った。それが今役立っている。唯一2001年に行ったサイクロトロン冷却方法の変更はその3年前に材料は入手していたができずにいて、工場の方の出張協力を得てようやく実現した。技術の貯金にも余裕は必要である。

所内に教わる人がいない中、リニアック技術研究会は、私にとっては貴重な情報源・教わる場所であった。同研究会に行くとき知りたい情報が得られた。同研究会の報告書は私の教科書であった。また、研究者や技術職員仲間から教わったし、助言や励ましも貰った。保守に追われて1994年から参加していなかったが、2002年に井上信前所長に背中を押されて現状報告をした。行くと懐かしい人が多く、有効な情報や親切も受けた。

40年間保守をしていると色々な問題に出会う。しかし、米国の加速器メーカーに相談したのは加速管に拡散ポンプの油を入れた時の対応だけである。研究会や参加されている方に教わったことは数多い。

メーカーの技術者は製作する時にその時点で持っている経験や知識で作る。しかし、大学の技術職員は作っ

てから装置の面倒を見る中で手直しができ、その中で学んでいける。モジュレータの保守はその典型である。メーカーの技術者にはできない作業である。

## 6. おわりに

我々の世代は教員に採用され、使える人間になるようにゆっくりと育てられたがそんな時代が去ろうとしている。今、大学では技術職員が組織化され、技術職員を集めようとされている。これは教員が研究成果を厳しく問われ、我々まで育てる余裕がなくなった結果のようである。技術進歩の激しい中、技術職員だけで閉じて技術職員の進歩は難しいと思える。研究者と一緒にいて始めて面白いこと、楽しいことが判り、成長できるように思う。リニアック技術研究会のように加速器学会も我々技術職員との関係を保って頂きたいとお願いしたい。そして、それがお互いのプラスになることを強く望んでいる。

今夏、原子炉実験所で行われた研究会「原子力分野における加速器開発Ⅱ」で本誌の編集長である安東先生が「遊び心」の大切さを説かれていました。この話を伺い嬉しくなった。それは、2年ほど前に私が所内技術研修会の報告（本レポートの元になった報告）の最後に記した「技術の向上に遊び心の必要性和回り（上司、指導者）に求めた余裕」と同じだったからである。

## 謝 辞

京大炉ライナックを曲りなりに動かしてこられたのはリニアック技術研究会のおかげです。同研究会の皆さんにこの場を借りてお礼を申し上げます。

最後に本学会誌に投稿の機会を与えていただき、深く感謝致します。また、目を通していただいた方々にも感謝致します。編集長から「加速器を利用した研究を支えている現場の状況、苦労話や喜びを感じるころ、等々……自由に記述していただけないか」と言って頂き、40年間現場で楽しませてもらった者としてお引き受けした次第です。