

電荷注入型可変コンデンサによる X線線量測定

吉 村 厚

(1995年5月10日受理)

1. ま え が き

この研究は放射線計測分野において電荷注入型コンデンサの新しい利用法についておこなったものである。この利用法はその物性的性質を基に放射線線量測定の新しいセンサとして利用する方法である。

半導体を利用した放射線量測定は、シリコンダイオード⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を使用したものが多い。シリコンダイオードは固体であるため、同じ容積の電離箱に比べ、密度で2,000倍、W値（1個のイオン対または電子—正孔対を作るのに要する平均のエネルギー）で10倍、合計約20,000倍の放射線感度をもっている。したがって小型化でき、位置分離能が良い。この場合、シリコンの結晶が 1mm^3 位が一般に用いられている。また密封性を持たせることも容易で、水ファントムにそのまま挿入できる利点がある。しかし温度特性が非常に悪く、測定中に大きいドリフトを生ずる。温度特性を良くするため、シリコンダイオードに外部よりバイアス電圧を印加せず、P-N接合の障壁電圧を利用して演算増幅器による電離電流の測定がおこなわれている。この方法によると温度特性は、かなり改善される。しかし放射線治療のための線量分布曲線の測定は、水ファントム中で、1時間程度の測定時間を要するので、なおこのドリフトは無視出来ない。このため現在ではシリコンダイオードによる線量測定はあまりおこなわれなくなった。

電荷注入型可変コンデンサを使用した場合には、照射線量は、電気容量の変化として測定される。この容量変化は20pF程度であるため、微小容量を測定しなければならないので、高価な微小容量計を必要とし、ストレーキャパシティの影響等の考慮が必要となる。このため精度のよい治具等の開発が必要である。しかし発振回路の同調素子として使用することにより、発振周波数の変化として測定することが出来る。この方法は安価で高精度の周波数カウンタが使用出来るだけでなく、照射中に線量が読出せるので、モニタ等の使用に都合が良い。また電荷注入可変コンデンサは固定したまま照射をおこない、その都度発振周波数を測定するので、ストレーキャパシティの変化は生じない。周波数カウンターは一般に8桁の表示が可能であるため、微小な容量変化も測定出来、線量測定の精度も向上する。またフローティングゲート型の線量計は一辺が約100ミクロンと非常に小型であるため、前述のシリコンダイオードに比べても一辺が約1/10で、おそらく世界で一番微小な検出器であると思われる。このため放射線生物学の分野及びこれに関連するマイクロシメトリの研究には非常に有用であると考えられる。

また電波として送信すれば、受信側で周波数を測定することにより、ワイヤレスでデータを読出ることが出来る。

2. 電荷注入型可変コンデンサの構造

セイコー電子工業社製電荷注入型可変コンデンサ S-8511A⁽⁵⁾ は、電子を注入することにより、電氣的に容量が設定できる MOS ダイオード素子である。S-8511A の I/E とアノード端子間に電圧パルスを印加することで、極めて正確に容量を設定でき、この容量は半永久的に維持される。また機械的可動部がないので、有機溶剤による洗浄でも容量が変化しない。

図1に電荷注入型可変コンデンサの断面図を示す。また表1に電荷注入型可変コンデンサの電氣的特性を示す。黒色の部分がフローティングゲートである。フローティングゲート内に電子を注入することにより、カソードとアノード間が可変コンデンサとして動作する。ここでQをフローティングゲート内の電荷総量、バイアス電圧をVとすれば、容量Cは下記の式で表される。

$$C = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots (1)$$

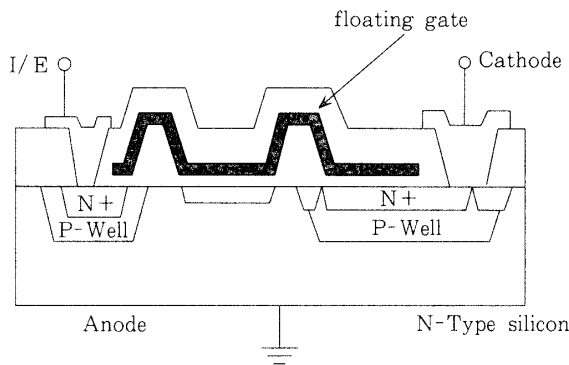


図1 電荷注入型可変コンデンサの断面

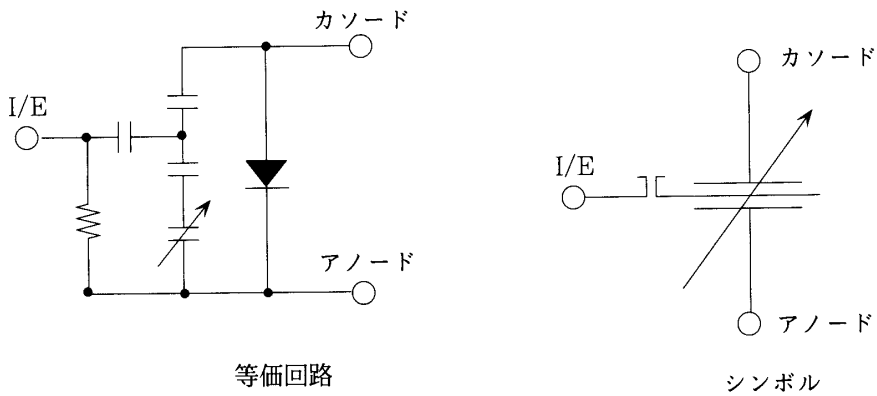
つまりフローティングゲート内の電子数に比例して容量が設定される。電氣的等価回路を図2(a)に示す。またこの図には電荷注入型可変コンデンサのシンボルも示す。

電荷注入は I/E 端子（1番ピン）とアノード端子（2番ピン）の間に約 15~18V の直流電圧を I/E 端子をプラスとして、瞬間的に印加すればよい。容量を減少したければ、逆極性の電圧を印加すればよい。この方法はパルス発生器を使用する必要が

表1 電荷注入型可変コンデンサの電氣的特性

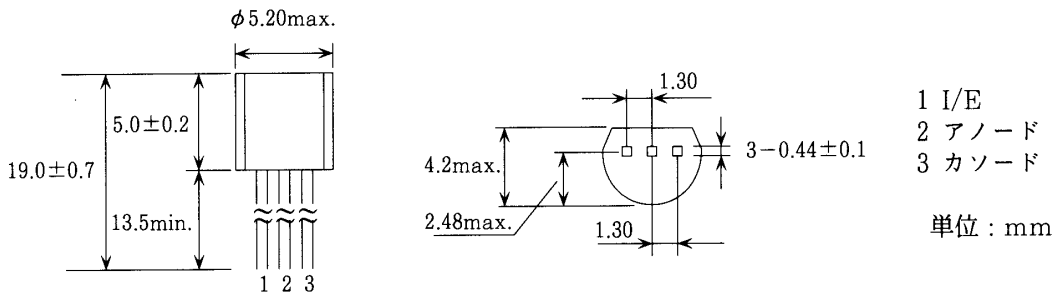
項目	記号	試験条件	Min.	Typ.	Max.	単位	
動作電圧範囲	V _{SS}	C _{min} ~C _{max}	-5.5		-0.2	V	
動作周波数	f _{max}	C _{min} ~C _{max}	0.01	4.0	10.0	MHz	
I/E 端子入力抵抗	R _{IN}	—	200	300	700	Ω	
容量範囲	最小値	C _{min}	V _{SS} =-1V	5	7	9	pF
	最大値	C _{max}	V _{SS} =-1V	25	28	30	pF
I/E 端子電圧範囲	容量増加	V _{IN}	V _{SS} =0V	16	18	20	V
	容量減少	V _{IN}	V _{SS} =0V	-16	-18	-20	V
I/E 端子可変速度	容量増加	t _{INC}	V _{SS} =0V, V _{IN} =18V		20	40	ms
	容量減少	t _{DEC}	V _{SS} =0V, V _{IN} =-18V		20	40	ms
容量温度係数	最小値	T _{Cmin}	-40~90°C	-300	-200	-100	ppm/°C
	最大値	T _{Cmax}	-40~90°C	1,400	1,600	1,800	ppm/°C

電荷注入型可変コンデンサによるX線線量測定

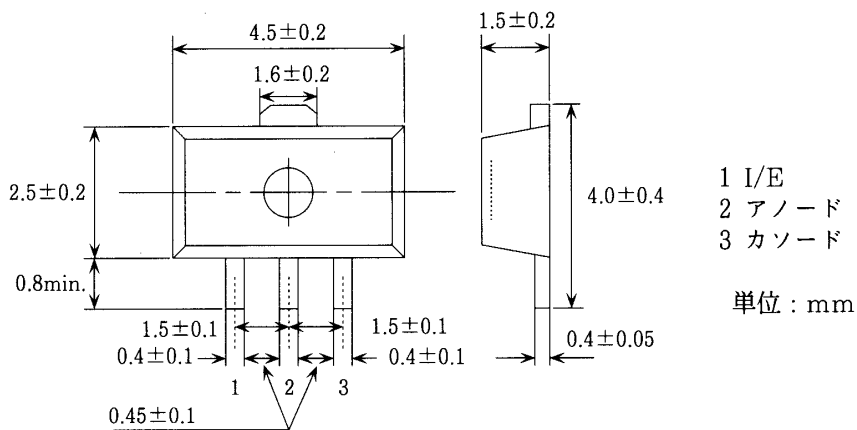


(a)

1. TO-92



2. SOT-89(ミニパワーモールド)



(b)

図2 電荷注入型可変コンデンサの外形寸法、等価回路及びシンボル

なく、15～18V の直流電源を用いて瞬間的に印加すればよい。S-8511A は標準で、バイアス電圧、-1V でて 7～28pF の間の容量が設定できる。

図2 (b) に電荷注入型可変コンデンサの外形寸法を示す。TO-92 型で 5.2mmφ×5.0mm と、SOT-89 (ミニパワーモールド) 型で、4.5×2.5×1.5mm³ と 2 種類あり非常に小型の素子である。この測定では SOT-89 型を使用した。

表1 によれば容量対温度係数の最大値は-40～90℃で 1,800ppm/℃ で最大動作周波数は 10.0MHz である。

3. 電荷注入型可変コンデンサの電気容量変化による読出方式及び測定結果

X線線量測定の原理はあらかじめ電子を注入したコンデンサにX線を照射し、放射線との相互作用により電子を叩き出し、注入電子数を減少させる。その結果電気容量が減少することになる。照射線量の測定は照射前の電気容量から照射後の電気容量を差引いた値が照射線量に比例する。電気容量の測定器として YHP 社 4192A 型 LF インピーダンス・アナライザを使用した。この測定器は測定周波数範囲が 5Hz から 13MHz 迄である。電気容量の測定範囲は 0.1pF から 100mF 迄で、基本確度は±0.1%である。また誘電体損失D (1/Q) は0.0001から19.999迄で基本確度は±0.0011%である。直流バイアスは±35V まで可変出来る。表示は4・½桁である。自動ゼロ調整機能があり、測定用治具等の残留容量は自動的に差引くことが出来る。

X線発生器は 80kVp から 200kVp までは、島津製作所 STH250M-2 を、10kVp から 50kVp まではジューメンス社 DERMOPAN-2 を使用した。測定は電荷注入型可変コンデンサを 18V 直流電源を使用して充電する。LF インピーダンスアナライザによりバイアス電圧を印加して、電気容量の測定をおこなう。その後この素子にX線を照射する。照射後再び電気容量の測定をおこない、前の測定値から差引く。この電気容量の差から照射線量を求める。図3に 200kVp で $2.58 \times 10^{-1} \text{C/kg}$ までの線量に対する直線性を測定した結果を示す。

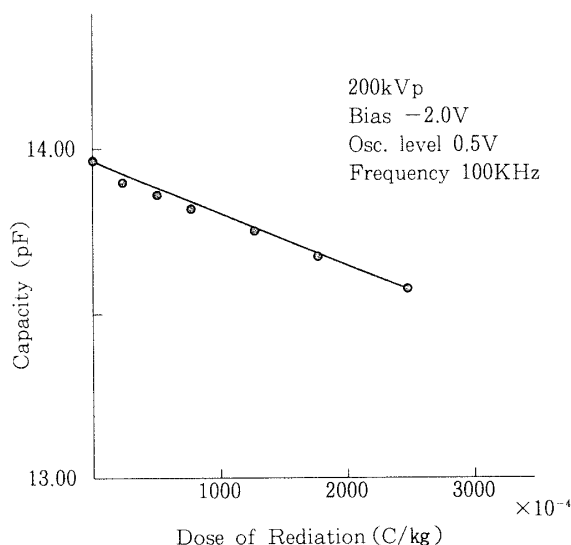


図3 線量対キャパシティ

この図によると、測定データは直線からのずれがみられる。後述するように、照射線量対発振周波数の変化を測定した結果は良い直線性を示している。インピーダンスアナライザの基本確度は±0.1%であるが、0.01pF 位の微小容量測定では、測定治具に注意してもストレーキャパシティによる誤差が ±0.02pF 位生じる。この直線からのずれは、ストレーキャパシティの変化による誤差と思われる。

図4にX線エネルギー特性を示す。40kVp 位が高感度になっている。なおバイアス電圧は -2V である。リファレンス線量計として 100kVp から 200kVp まで

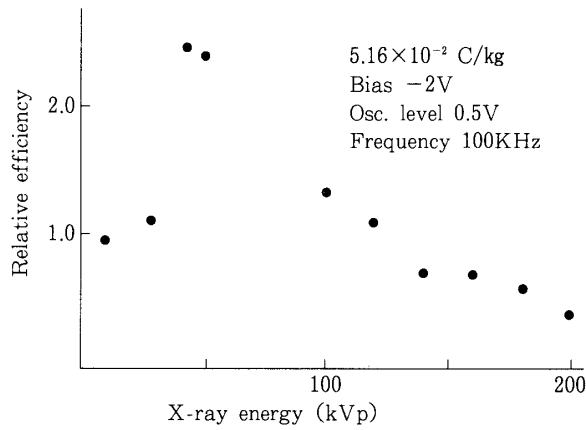


図4 エネルギー特性

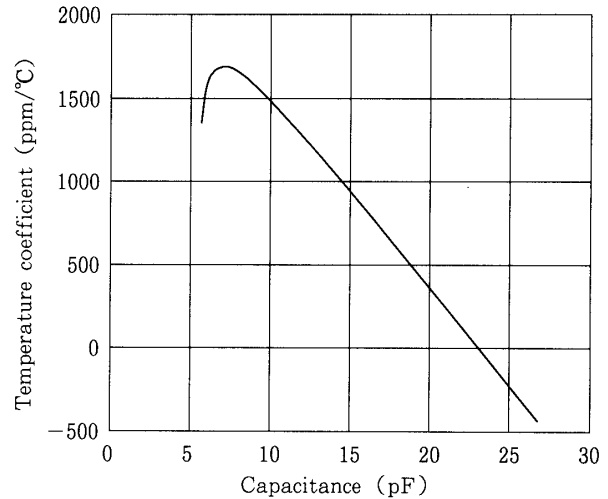


図5 容量対容量の温度係数

は IONEX, TYPE2500/3 とイオンチェンバーとして体積 0.6cc を使用した。DERMO-PAN-2 については IONEX, イオンチェンバー体積 0.3cc を使用した。

電荷注入型可変コンデンサの容量対容量の温度係数を図5に示す。この測定結果はセイコー電子工業にておこなわれたものである。この図に示すように 23pF 附近では温度係数がゼロである。また 10pF 附近では 1,500ppm/°C である。この測定では 14pF 附近の容量を使用したのので 1,000ppm/°C である。この場合±10°Cの温度変化に対して容量は±1%の変化となる。20~25pF 位の所で使用すれば温度特性はもっと良くなる。またフローティングゲートの寸法公差は100±1ミクロンの精度で製作されている。それでこの電荷注入型可変コンデンサの各素子間のバラつきは約±2%以内にはいると思われる。実際に数個の素子について実測した結果±2%以内であった。電荷注入型可変コンデンサの誘電体損失Dの値も同時に測定をおこなった。Dの値は0.02で 3C/kg の照射に対して変化はなかった。

4. 発振器の周波数変化による読出し方式及び測定結果

3. で電気容量測定による方法でX線線量の測定を行った。容量変化は 0.1pF 程度の微小変化を測定するため、ストレーキャパシティの影響により、測定誤差に及ぼす効果が大きい。測定は5端子法による方法でおこない、ストレーキャパシティの影響をのぞくための測定治具を使用した。しかし測定は十分注意しておこなわなければならなかった。それで電荷注入型可変コンデンサを発振回路内の LC 同調素子として使用することにした。この方法によれば、X線の照射前と照射後において幾何学的条件に変化を生じない。つまり電荷注入型可変コンデンサを脱着せずに測定出来るためである。このため照射前と照射後の期間において、ストレーキャパシティの変化が生じないためこの影響が無視できる。測定原理は、LC 共振回路のCの値がX線照射により、減少するため発振周波数が上昇する。この発振周波数の変化を周波数カウンタで測定すればよい。一般に物理量の測定では、周波数測定法が、高精度でかつ安価な測定器でおこなえるものに属している。この研究で使用した周波数カウンタはアトバンテスト社製 TR5822 型 8 桁カウンタを使用した。こ

の周波数カウンタは GP-IB インターフェースをもっているので、測定値をマイクロコンピュータに取り込み、データ処理をおこなうことが可能である。この処理により積算線量を C/kg 単位で表示することも容易である。

電荷注入型可変コンデンサ S-8511A は、最大使用周波数が約 10MHz である。C の変化に対する周波数変化を大きくするためにはインダクタンス L を小さく発振周波数を高くすればよい。S-8511A は表 1 に示すように容量範囲の標準値が 28pF、最高使用周波数の標準値も 4MHz であるので、3MHz 位の発振周波数を選択した。

X線線量測定は、照射前の発振周波数の値と照射後の値の差から求めることが出来る。電気容量測定法と異り、この方法によれば照射中に照射線量を直視することが可能であるためモニタとしても利用出来る利点がある。

以下この研究で使用した発振回路⁽⁵⁾ について述べる。全回路を図 6 に示す。発振回路はハートレー型で Q1 2SK55FET により発振をおこなう。インダクタ 38 μ H はフェライトコアに巻いてある。またコア内のフェライトがねじにより移動出来るので、発振周波数は、ある程度可変出来るようになっている。このコイルのタップから FET Q1 のソース電極に正のフィードバックが、かけられている。S-8511A の直流バイアス電圧は、1.5V \times 2 の乾電池を使用して、5k オームの可変抵抗器により、0 から -3V 迄可変出来る。この電圧は 120k オームの抵抗を通して印加されている。Q2 2SC458 トランジスタは Q1 のドレイン電圧を約 +3V に保つためのボルテージレギュレータである。発振出力は Q3 2SC535 及び Q4 2SK55 で増巾され、Q5 2SC458 のエミッタフロワにより出力インピーダンスを低くして、出力端子より同軸ケーブルによって周波数カウンタの入力へ接続される。

X線発生器は島津製作所 STH250M-2 を使用した。図 7 に 160kVp X線照射による発振周波数変化を示す。電荷注入型可変コンデンサのバイアス電圧は -3V である。照射 X線線量の増加にしたがって、電荷注入型可変コンデンサの電気容量が減少し、発振周波数が上昇しているのがわかる。発振周波数 f は同調回路のインダクタンスを L、キャパシタ

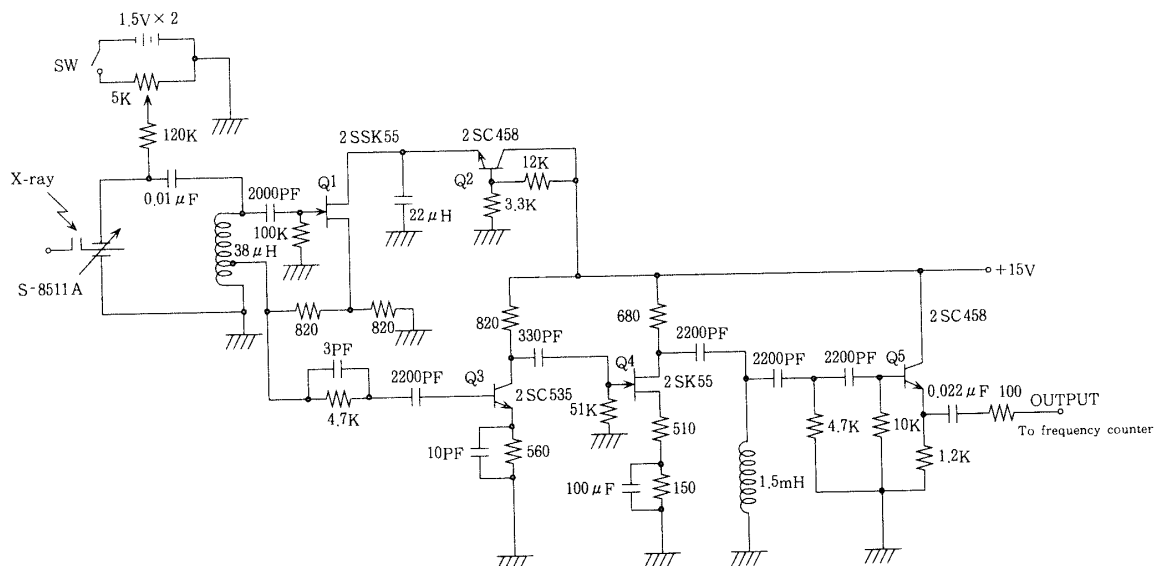


図 6 発 振 回 路

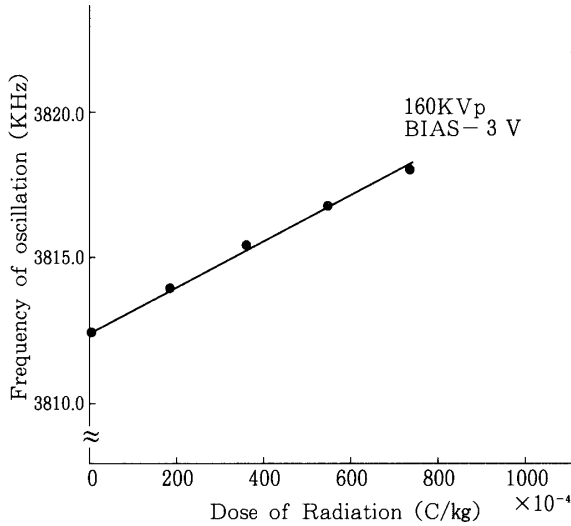


図7 線量対発振周波数

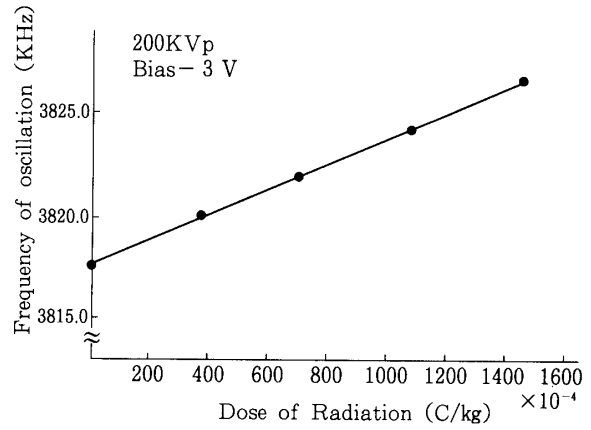


図8 線量対発振周波数

ンスをCとすれば下記の式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (2)$$

この式によれば発振周波数 f は \sqrt{C} に逆比例することになるが、容量変化が非常に小さい範囲であるため、直線性を示している。

図8に 200kVp X線照射による発振周波数変化を示す。バイアス電圧は同じく -3V である。発振周波数に対する照射線量は直線性を示している。

5. あとがき

今後これらの新しい方式が、どのような分野に利用出来るであろうか、簡単に述べる。電荷注入型可変コンデンサは価格が1個100円位で非常に安価である。この素子は耐放射線に対して十分であるが、安価であるので、使い捨てしてもよい。発振回路に使用する方式は、連続的なモニタとして使用が可能であるため、資料照射のモニタとして有効である。また有感部が最も小さいので、SOR による細胞照射におけるマイクロシメトリ測定に有用である。しかしこれらの線量計のもっともよい利用は放射線治療の線量分布測定への応用である。従来この測定にはシリコンダイオードが使用されているが、温度特性が非常に悪く、ドリフトが生じやすいので現在ほとんど使用されていない。位置精度のよい新しい線量分布測定器が求められていた。

X線照射を行うにあたり、九州大学医学部放射線基礎医学教室 荒巻亮二助手及び、九州大学医学部附属病院中央放射線部 泉隆技師に心より感謝致します。また高価な 4192A 型 LF インピーダンス・アナライザを、借用させていただいた新川 YHP 福岡支店に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) Dixon R. L. and K. E. Ekstrand: Int. J. Appl. Isot. 33. 1171 (1982)
- (2) Rikner G. and E. Grusell: Acta Radiologica Oncology. 24. 65 (1985)
- (3) Rikner G.: Acta Radiologica Oncology: 24. 71 (1985)
- (4) Rikner G.: Acta Radiologica Oncology: 24. 205 (1985)
- (5) セイコー電子工業株式会社データシート: S-8511A, DS, No. PEAC-760 (1988)
- (6) 稲葉 保: 発振回路の完全マスター: 131, 日本放送出版協会, 東京 (1988)