

〔短 報〕

熱ルミネセンス線量計を用いた積算線量測定に係る留意点について (その2)

石川県保健環境センター 環境科学部放射線グループ 小 浦 利 弘・東海林 寛史
初 瀬 裕・中 谷 光

〔和文要旨〕

本県では平成2年7月から志賀原子力発電所の周辺環境放射線監視を実施しており、監視項目の1つである積算線量による測定は、熱ルミネセンス線量計（以下「TLD」という。）を用いて3ヶ月値を測定してきた。本報告ではTLDによる積算線量測定において素子による測定結果のばらつきや、読取装置に起因する感度の変動等、日常業務を通じて明らかになったいくつかの問題点について整理し、検証を行った。

「熱ルミネセンス線量計を用いた環境 γ 線量測定法」によると、TLD素子のばらつきは相対標準偏差で4～5%の範囲内と示されており、本県で使用している素子についても検証を行ったところ、示された範囲内に入ることが確認された。

また、読取装置内のリーダの温度変化が原因と思われる感度の変動について、読み取りを連続的にを行い、リーダを使用し続けた際の影響について検証を行った結果、最大14%の感度の変動が確認された。さらに、測定間にインターバルが空くことでリーダの温度が変動すると考えられることから、インターバルを変動させて検証を行った結果、5分のインターバルで最大28%の感度の変動があることが確認された。

このほか、電源を入れた状態での読取装置の長期的な安定性について検証を行った結果、長期的な安定性については問題がないことが確認された。

キーワード：積算線量，熱ルミネセンス線量計，環境放射線

1 はじめに

本県では平成2年7月から志賀原子力発電所の周辺環境放射線監視（以下「原電監視」という。）を実施しており、監視項目の1つである積算線量は、熱ルミネセンス線量計（以下「TLD」という。）を用いて測定している¹⁾。TLDは、宇宙線と大地や空气中に存在する放射性物質から放出される γ 線を同時に測定することができることや、電源を必要としないため、原子力災害時にお

る長期間の被ばく線量の評価を行うことができる特徴があり、これまで県内全域でTLDを用いた空間線量の調査が行われ、大辻らにより報告された例がある²⁾。

TLD測定は、まずTLD素子の汚れを拭き取った後に加熱処理（以下「アニーリング」という。）することで、素子に記録された放射線量の情報を初期化する。アニーリング後の素子に残存する放射線量の測定（以下「プレドーズ測定」という。）を行い、放射線量の情報が初期化されたことを確認し、TLD素子を各観測地点に設置

A few Points to Take Notice for the Integral Radiation Dose Measurement with Using a Thermoluminescent Dosimeter. by KOURA Toshihiro, SHOJI Hirofumi, HATSUSE Yuh and NAKATANI Mitsuru (Environmental Science Department, Ishikawa Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science)

Key words : Integral Radiation Dose, Thermoluminescent Dosimeter, Environmental Radiation

するまでの間、鉛容器に保管する。鉛容器に保管したまま運搬を行い、各観測地点にTLD素子を8素子設置し、3ヶ月後に回収し、鉛容器に保管して読取装置のある試験室（保健環境センター）まで運搬する。

また、保健環境センターと観測地点との間の運搬時に受ける線量を評価するために、運搬時に使用する鉛容器にはバックグラウンド（以下「BG」という。）測定用のTLD素子も入れておき、運搬時に受ける線量として評価している。測定値の補正は、 2π 型 γ 線照射装置（以下「照射装置」という。）による標準照射により行っている。

この手順の中で、保管する鉛容器の種類によるTLD素子への影響及び標準照射時におけるTLD素子への方向依存性についての検証は、既に筆者らが報告した。³⁾

本報告では日常の積算線量測定業務において明らかとなったTLD素子による測定結果のばらつきや、読取装置の感度変動などについて定量的に評価した。

「熱ルミネセンス線量計を用いた環境 γ 線量測定法」⁴⁾（以下「測定法シリーズ」という。）によると、「TLD素子のばらつきは相対標準偏差で4～5%の範囲内」と示されており、本県で使用している素子についてどの程度のばらつきを持っているかを検証した。

また、測定法シリーズによると、「読取装置内のリーダの温度上昇が原因と思われる感度低下が認められている」と示されていることから、本県が所有する読取装置についてどの程度の感度の変動が見られるのか検証を行った。検証は、リーダ感度を内部基準線源（C-14）により補正する係数であるCAL補正係数の変動を調査することで行った。CAL補正係数は読み取り値に乗じることによってリーダ感度の変動を補正する係数であり、リーダの使用時間が長いとリーダの温度上昇による感度低下が生じ、感度低下によりCAL補正係数が上昇することになる⁴⁾。

さらに、電源を入れ続けた状態での読取装置の長期的な安定性について検証を行った。

2 調査方法

2.1 測定方法

測定は測定法シリーズに準じて行った。TLD素子はパナソニック製UD-200S（CaSO₄（Tm））、読取装置は、パナソニック製TLD（放射線熱蛍光線量計）用リーダUD-5160Pを用いた。

TLD素子はアニーリングを行い、プレドーズ測定を行って線量情報が初期化されたことを確認した後に使用した。素子に既知量の放射線量を照射する標準照射には、コリメートされた千代田テクノル製の照射装置（Amersham製セシウム-137線源（2.22GBq、基準日：

平成3年9月19日、再校正日：平成20年6月17日）、平成28年2月末まで使用）又は日立アロカメディカル製の照射装置（QSA GLOBAL製セシウム-137線源（3.70GBq、基準日：平成27年4月29日、校正日：平成28年3月11日）、平成28年3月11日以降使用）を使用した。

2.2 TLD素子のばらつき

TLD素子のばらつきを評価するため、TLD 88素子アニーリングした後、プレドーズ測定を行った。次に、80素子について200 μ Gy/hの標準照射を行い鉛厚5cmの容器に測定までの間保管し、標準照射を行わなかった残りの8素子についてはBG測定用素子として同様に保管した。

標準照射したTLD素子を8素子で1セットとして読み取りを行い、8素子の読み取り値から最小値と最大値を除外し、平均した値から同様の方法で平均したBG値を差し引いた値を測定値とした。

2.3 CAL補正係数の連続測定時における変動

連続的な使用により、読取装置のリーダ温度が変動することで、CAL補正係数に対して影響を与えられられる。本県の読取装置はTLD素子の自動連続測定機能を有しており、最大200素子を1度にセットして読み取りでき、1セット毎に読み取り前に読取装置内部に設置されている内部基準線源を用いてリーダの感度補正を行い、CAL補正という形で読み取り値に反映させる仕組みとなっている。

そこで、連続測定によるリーダ感度の変動状況を把握するため、TLD 8素子を1セットとした読み取りを繰り返して行い、その都度CAL補正係数を算出することで検証したほか、積算線量の監視業務で通常行う48素子を1セットとした読み取りを繰り返し行うことで検証した。

2.4 CAL補正係数のインターバルによる変動

連続的な使用により、読取装置のリーダ温度が変動するほかに、インターバルが空くことにより、リーダの温度が低下し、CAL補正係数が低下する影響が考えられることから、インターバルによるCAL補正係数の変動について検証を行った。

検証はTLD 8素子を1セットとして、インターバル前のCAL補正係数が概ね 1.15 ± 0.01 及び概ね 1.18 ± 0.01 程度となるまで繰り返し読み取りを行った後、2～60分のインターバルを空けてCAL補正係数を算出することで検証した。

2.5 読取装置の長期的な安定性

読取装置の電源を入れ続けた状態での長期的な装置の安定性について以下のような検証を行った。

まず、176素子についてアニーリングを行い、プレドーズ測定を行った後、そのうちの88素子について同時に標準照射を行った上で鉛厚5cmの容器に読み取りまでの

間保管した。標準照射を行わなかった残りの88素子についてはBG測定用素子として同様に保管した。

TLD素子を8素子で1セットとし、8素子の読み取り値から最小値と最大値を除外し、平均した値からBGを差し引いた値を測定値とした。

標準照射した素子とBG用素子を各1セットずつ、最初は数時間程度毎、それ以降は1日1回程度読み取りを行った。

3 結果と考察

3.1 TLD素子のばらつき

2.2に示す方法で検証した結果を表1～3に示す。

1回目の80素子の読み取り値の範囲は228.2～287.6 μ Sv, 相対標準偏差4.45%, 2回目の範囲は226.9～279.3 μ Sv, 相対標準偏差4.65%, 3回目の範囲は220.5～279.6 μ Sv, 相対標準偏差4.35%であり、読み取り値のばらつきは相対標準偏差で4.35～4.65%であり、測定法シリーズにおいて示されている4～5%の範囲内となった。

読み取り値から算出した測定値の範囲は、1回目246.9～261.7 μ Sv, 相対標準偏差2.13%, 2回目242.4～

264.5 μ Sv, 相対標準偏差2.50%, 3回目249.6～264.1 μ Sv, 相対標準偏差1.93%であり、測定値のばらつきは相対標準偏差で1.93～2.50%であり、読み取り値と比較して半分程度となっていた。よって、TLD8素子の読み取り値から最小値と最大値を除外し、平均した値からBGを差し引いた値を測定値とすることで、測定値の相対標準偏差が2～3%となることが確認された。

3.2 CAL補正係数の連続測定時における変動

2.3に示す方法で検証した結果を表4に示す。

繰り返し測定の結果、0素子時点のCAL補正係数は1.022～1.037であるが、8素子時点で1.079～1.081, 16素子時点で1.105～1.122, 48素子時点で1.131～1.159まで上昇した。

8素子を1セットとした読み取りでは、80素子から192素子時点までのCAL補正係数の範囲が1.171～1.188, 平均値が1.179, 96素子から192素子時点までの範囲が1.172～1.188, 平均値が1.180, 112素子から192素子時点までの範囲が1.172～1.186, 平均値が1.180であり、1.18を中央として概ね ± 0.01 程度の範囲で安定する結果となった。

表1 TLD素子のばらつき(1回目)

	1セット	2セット	3セット	4セット	5セット	6セット	7セット	8セット	9セット	10セット	BG	全読取値の集計値		
読取値 (μ Sv)	245.9	261.6	260.5	240.4	271.9	231.3	248.1	252.4	271.1	268.3	2.8	平均值(μ Sv)	257.5	
	255.0	248.4	268.0	264.9	274.0	256.6	265.6	267.2	271.3	259.6	2.5	標準偏差	11.5	
	228.2	240.3	263.4	262.8	251.0	271.2	271.9	263.6	264.9	241.8	2.5	CV(%)	4.45	
	240.0	251.0	266.6	271.4	270.2	259.5	265.9	244.4	255.2	253.1	2.7	測定値の集計値		
	249.2	241.5	274.0	254.0	255.1	266.6	263.1	287.6	238.2	238.6	2.8	平均值(μ Sv)	255.2	
	261.6	247.2	264.6	263.0	268.8	261.2	257.9	253.5	254.0	265.2	3.3	標準偏差	5.43	
	248.5	262.9	249.0	250.5	253.6	245.8	254.8	243.0	255.7	269.2	2.7	CV(%)	2.13	
	259.5	250.9	263.6	267.6	267.2	259.3	275.9	238.0	247.1	252.4	3.0			
	測定値 (μ Sv)	246.9	247.4	261.7	257.7	261.7	255.4	260.4	251.2	255.2	254.0	2.8		

※lot21-3000番台を使用

表2 TLD素子のばらつき(2回目)

	1セット	2セット	3セット	4セット	5セット	6セット	7セット	8セット	9セット	10セット	BG	全読取値の集計値		
読取値 (μ Sv)	230.2	261.6	255.8	256.4	271.0	261.3	254.1	255.5	250.0	244.6	2.9	平均值(μ Sv)	253.3	
	238.0	255.8	266.9	261.5	259.4	279.3	250.7	258.2	261.2	263.8	3.1	標準偏差	11.8	
	249.4	250.5	255.4	256.4	246.9	271.8	245.7	249.6	260.6	244.4	2.9	CV(%)	4.65	
	240.6	257.5	235.1	265.4	262.5	244.7	266.5	234.1	226.9	237.3	3.5	測定値の集計値		
	248.2	234.2	239.9	259.0	232.3	273.5	249.9	266.1	244.3	273.3	3.3	平均值(μ Sv)	253.7	
	246.3	247.4	247.2	275.4	243.0	239.6	246.7	246.5	244.9	262.7	3.5	標準偏差	6.35	
	233.5	249.5	271.4	250.2	262.2	272.5	252.2	243.5	250.1	273.4	3.7	CV(%)	2.50	
	247.5	252.7	250.5	267.7	261.7	263.1	249.8	242.2	254.3	257.3	3.3			
	測定値 (μ Sv)	242.4	252.2	252.6	261.1	256.0	264.5	250.6	249.2	250.7	257.7	3.3		

※lot35-5000番台を使用

表3 TLD素子のばらつき(3回目)

	1セット	2セット	3セット	4セット	5セット	6セット	7セット	8セット	9セット	10セット	BG	全読取値の集計値		
読取値 (μ Sv)	253.5	245.6	233.3	258.5	230.4	245.2	263.1	254.4	268.8	244.6	3.9	平均值(μ Sv)	256.1	
	266.0	246.2	255.0	267.9	246.6	261.5	247.4	256.8	268.7	259.2	3.7	標準偏差	11.1	
	249.1	245.0	267.5	258.5	261.3	268.1	265.6	264.8	266.1	260.9	3.7	CV(%)	4.35	
	220.5	257.6	249.9	248.2	251.0	261.4	271.9	264.5	275.1	265.8	4.5	測定値の集計値		
	258.9	241.8	242.9	257.3	274.7	256.4	264.3	258.8	254.9	269.3	4.3	平均值(μ Sv)	257.0	
	247.3	256.7	264.7	247.8	267.1	255.1	265.3	267.4	243.5	263.0	4.2	標準偏差	4.96	
	258.0	253.1	238.2	240.5	267.3	261.3	256.3	257.2	279.6	262.4	4.0	CV(%)	1.93	
	255.9	250.9	254.9	257.3	241.4	251.7	269.8	228.8	249.8	247.9	4.0			
	測定値 (μ Sv)	253.8	249.6	250.9	254.6	255.8	257.9	264.1	259.4	263.9	259.8	4.0		

※lot35-5000番台を使用

表 4 読取素子数とCAL補正係数

読取素子数	CAL補正係数				CAL補正係数の変動(%)			
	8素子毎 1回目	8素子毎 2回目	48素子毎 1回目	48素子毎 2回目	8素子毎 1回目	8素子毎 2回目	48素子毎 1回目	48素子毎 2回目
0	1.032	1.037	1.022	1.031	4.4	4.1	9.6	9.9
8	1.079	1.081			2.4	3.7		
16	1.105	1.122			1.7	1.7		
24	1.124	1.141			0.8	0.1		
32	1.134	1.142			1.1	0.8		
40	1.146	1.151			0.1	0.7		
48	1.147	1.159	1.131	1.144	0.5	0.2	1.5	0.8
56	1.153	1.161			0.3	0.1		
64	1.157	1.162			-0.3	0.5		
72	1.154	1.168				0.3		
80		1.171				0.2		
88		1.173				0.2		
96		1.175	1.148	1.153		1.1	0.1	1.3
104		1.188				-0.4		
112		1.183				-0.8		
120		1.174				0.8		
128		1.184				-0.5		
136		1.178				0.3		
144		1.181	1.149	1.168		-0.1		0.8
152		1.180				0.3		
160		1.183				0.3		
168		1.186				-0.3		
176		1.183				-0.3		
184		1.179				-0.6		
192		1.172		1.178				-0.4
240				1.173				0.7
288				1.181				0.2
336				1.183				0.0
384				1.183				0.0
432				1.183				-0.8
480				1.174				

48素子を1セットとした読み取りでは、192素子から480素子時点までのCAL補正係数の範囲が1.173～1.183、平均値が1.179、288素子から480素子時点までの範囲が1.174～1.183、平均値が1.181であり、8素子の場合と同様に1.18を中央として概ね±0.01程度の範囲で安定する結果となり、CAL補正係数の安定状態の値は概ね1.18±0.01であることが判明した。

よって、8素子を1セットとした読み取りを行う場合は空読み取りを80素子（所要時間約70分）、48素子を1セットとした読み取りを行う場合は空読み取りを192素子（所要時間約90分）行うことで安定した測定が可能となることが判明した。

空読み取りを行うことで安定的な測定が可能となるが、測定に多くの時間を要することとなる。そこで分析に要する時間を短縮する手法について検討し、その結果を図1に示す。CAL補正係数の変動幅に着目すると48素子を1セットとした読み取りでは48素子から96素子時点までのCAL補正係数の変動が0.8～1.5%、96素子から144素子時点までの変動が0.1～1.3%、144素子から192素子時点までの変動が0.8%となっており、48素子時点以降の48素子測定毎の変動は1.5%以下となっていた。この変動幅は安定状態と考えられる概ね1.18±0.01に到達した時点での変動幅である1.7%（算出根拠：(1.19-1.17)/1.19×100）よりも小さい。このことから、49素子から

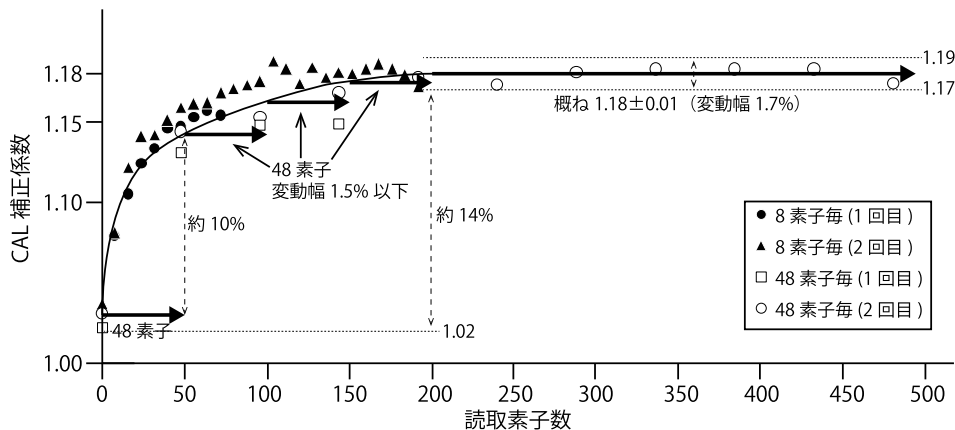


図 1 CAL補正係数の連続測定時における変動

表5 セット間インターバルにおけるCAL補正係数の変動

インターバル前CAL補正係数 概ね1.15±0.01								
インターバル(min)	3	5	5	10	15	20	30	60
インターバル前CAL補正係数	1.148	1.161	1.150	1.144	1.148	1.144	1.153	1.154
インターバル後CAL補正係数	1.143	1.134	1.126	1.095	1.088	1.074	1.071	1.044
CAL補正係数の変動幅(%)	0.44	2.33	2.09	4.28	5.23	6.12	7.11	9.53

インターバル前CAL補正係数 概ね1.18±0.01					
インターバル(min)	3	5	10	30	60
インターバル前CAL補正係数	1.176	1.179	1.187	1.171	1.178
インターバル後CAL補正係数	1.163	1.146	1.122	1.073	1.058
CAL補正係数の変動幅(%)	1.11	2.80	5.48	8.37	10.2

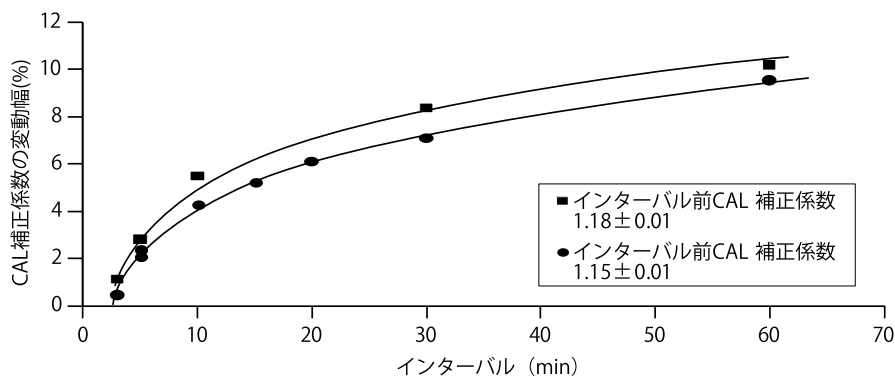


図2 インターバルとCAL補正係数の変動幅の関係

測定を開始し、以降、CAL補正係数が概ね1.18±0.01に達するまでの間、48素子毎にCAL補正を行うことで精度を保ちながら、分析時間の短縮をすることが可能であることが判明した。

また、読取装置は各セット測定開始時点のCAL補正係数を用いて当該セットの測定値全て（最大で200素子）を補正することから、安定する前のCAL補正係数が測定結果に反映された場合、今回の結果では、本来CAL補正係数が1.188であるにもかかわらずCAL補正係数1.022で計算される可能性があることから、最大で14%

もの読み取り値のずれを生じさせる可能性があり（図1参照）、十分な注意が必要であることが示された。

3.3 CAL補正係数のインターバルによる変動

2.4に示す方法で読み取りセット間のインターバルに対するCAL補正係数の変動を検証した結果を表5及び図2に示す。

インターバル前CAL補正係数が概ね1.15±0.01となった後のインターバルが3分であればCAL補正係数の低下幅は0.44%であるが、5分で2.09～2.33%、10分で4.28%、60分では9.53%となり、3.2で示した0素子時点と同程

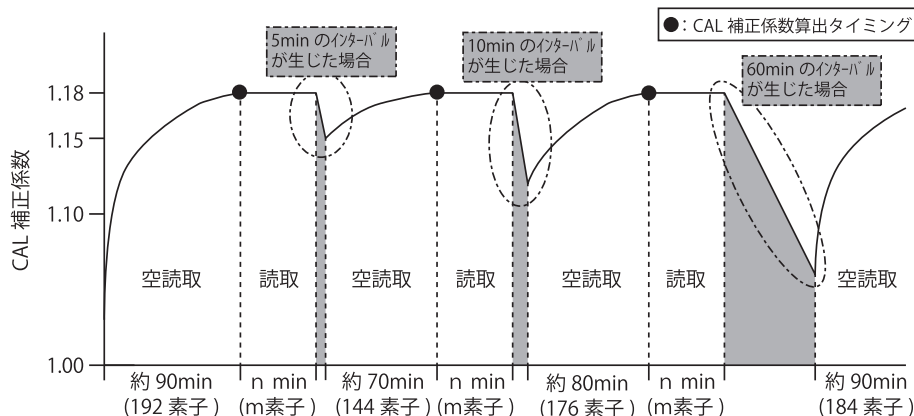


図3 CAL補正係数 概ね1.18±0.01での読み取り方法

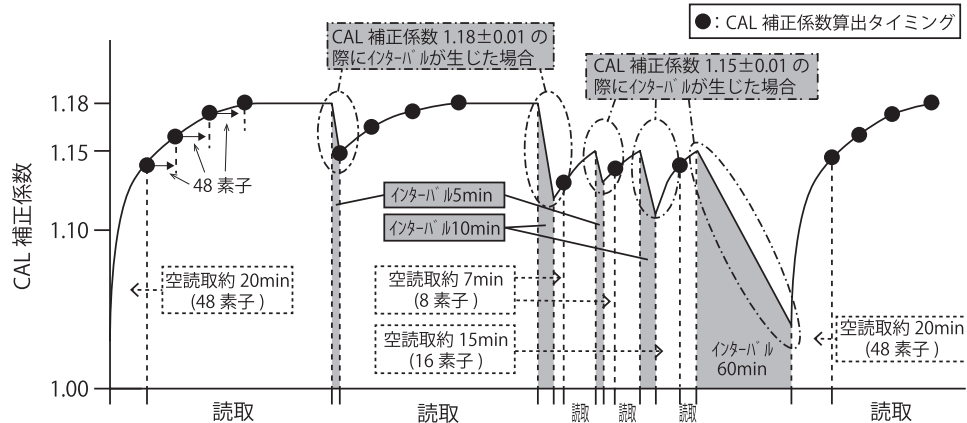


図4 CAL補正係数 概ね1.15±0.01以上の読み取り方法

度のCAL補正係数となった。

インターバル前CAL補正係数が概ね1.18±0.01となった後のインターバルが3分の場合は1.11%, 5分で2.80%, 10分で5.48%, 60分では10.2%となり、インターバル前補正係数が概ね1.15±0.01の時と比較してインターバルによる影響が大きくなる結果となった。

インターバル5分でのCAL補正係数の変動は2～3%程度で、3.1に示したTLD素子そのもののばらつきと同程度であることからそれほど大きな変動では無いと捉えることもできるが、CAL補正係数の変動はばらつきではなく、測定値に対して一定のずれを発生させるものであり、大きな影響を与える。

リーダ感度が安定するCAL補正係数が概ね1.18±0.01で行う場合の読み取り方法について、3.2に示した結果を含めて図3のとおり取りまとめた。その結果、90分間空読み取りを行うことで安定した測定が可能となるが、インターバルが5分空いてしまうと再度空読み取りが70分必要となり、10分空いてしまうと80分必要となり、わずかなインターバルを生じるだけで当初の空読み取りに近い時間が必要となる。

実際の読み取り操作の際、インターバル3分以下で分析を継続するのは困難であるか、リーダ感度を安定させるための空読み取りを行った直後にインターバルが空い

た場合でも同様の変動をすることから、CAL補正係数概ね1.18±0.01での連続した読み取り操作は現実的な方法とは言えない。

そこで、3.2に示した結果も踏まえて図4のとおり読み取り方法を構築した。

CAL補正係数が概ね1.15±0.01を超えるまでの20分間は空読み取りを行い、その後、概ね1.18±0.01に達するまでの間は48素子程度毎にCAL補正を行い、概ね1.18±0.01に達した後はインターバルを生じない限り連続した読み取りを行う。インターバルを生じた場合、概ね1.15±0.01に達するまでは空読み取りを行うが、CAL補正係数が概ね1.18±0.01に達した後のインターバルが5分程度であれば、CAL補正係数は1.15程度で、空読み取りは不要となり、10分の場合は、約7分の空測定を実施することで読み取りを再開できることから、図4に示す方法で読み取りを行うという現実的な手法を確立できたと考えられた。

3.4 読取装置の長期的な安定性

読取装置の電源を入れ続けた状態での読取装置の長期的な安定性の検証のために、最初に測定した読み取り時刻を基準として定期的に読み取った結果を表6に示す。

測定値は、232.3～246.3 μSv、相対標準偏差1.59%であり、測定値の平均値に対するずれは-2.57～3.31%で

表6 読取装置の長期的な安定性

経過時間	0	12	15	18	21	24	81	105	129	153	177
読取値 (μSv)	233.0	243.4	240.6	233.6	257.2	221.9	230.3	236.8	247.9	248.9	258.7
	233.5	241.3	251.5	256.7	249.1	254.4	248.9	250.2	252.3	253.1	240.2
	237.9	233.0	243.2	238.0	235.4	252.6	244.7	234.8	236.4	229.6	246.7
	243.5	231.1	252.2	248.1	257.1	240.8	237.4	231.6	227.6	249.9	225.8
	240.7	240.4	241.9	242.1	250.3	251.6	242.7	256.4	241.8	238.6	231.9
	253.9	239.7	236.1	239.9	247.0	246.5	236.8	235.5	242.5	244.5	240.9
	238.2	244.9	239.8	240.5	248.3	228.7	233.8	233.4	240.9	253.6	249.5
	239.9	243.7	241.1	250.0	242.6	240.9	244.0	214.9	233.0	240.9	243.1
測定値 (μSv)	237.1	237.8	240.5	240.3	246.3	241.0	235.8	232.3	235.3	240.4	235.7
測定値の平均値 に対するずれ(%)	-0.55	-0.25	0.86	0.78	3.31	1.07	-1.08	-2.57	-1.29	0.83	-1.12

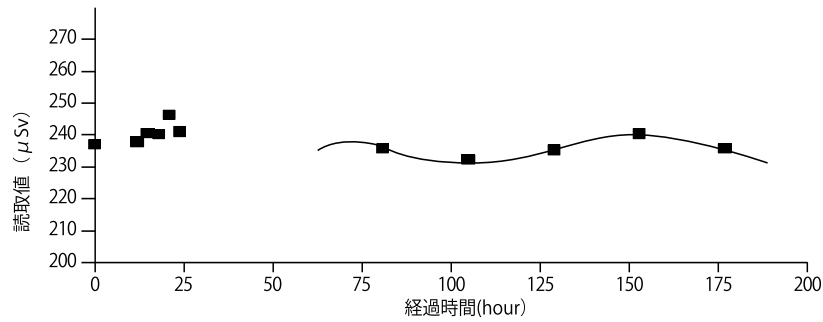


図5 経過時間と読取値の関係

あった。経過時間と測定との関係は図5のとおりとなり、長期的な揺らぎが見られるが、3.1のとおり測定値のばらつきが2～3%あることを考慮すると、差があるとは言えず、読取装置の長期的な安定性について、測定値に影響を与えるような変動は無いことが確認された。

4 ま と め

今回の検証結果から、TLD素子の読み取り値のばらつきは相対標準偏差で4～5%あり、8素子の値を用いて測定値を算出することで相対標準偏差が2～3%となることが確認された。

読取装置は各セット測定開始時点のCAL補正係数を用いて当該セットの測定値全てを補正することから、リーダが安定する前のCAL補正係数が測定結果に反映された場合、大きなずれを発生させることになる。よって、CAL補正係数が概ね 1.15 ± 0.01 を超えるまでの間は空読み取りを行い、その後、概ね 1.18 ± 0.01 に達するまでの間は48素子程度毎にCAL補正を行い、概ね 1.18 ± 0.01 に達した後はインターバルを生じない限り連続した読み

取りを行う。インターバルを生じた場合でも同様の操作を行うことで誤差を最小限に抑えながら読み取り時間を短縮できる手法を確立した。

そのほか、読取装置の長期的な安定性については測定値に影響を与えるような変動はないことが確認された。

文 献

- 1) 石川県：平成25年度年報「志賀原子力発電所周辺環境放射線監視結果報告書」
- 2) 大辻真紀子, 小森正樹, 中谷光, 今井利夫, 安井嘉朗：石川県における空間線量調査結果(その2), 石川県衛生公害研究所年報, 27, 349-356 (1990)
- 3) 小浦利弘, 東海林寛史, 堅田勉：熱ルミネセンス線量計を用いた積算線量測定に係る留意点について, 石川県保健環境センター年報, 52, 105-108 (2015)
- 4) 文部科学省：放射能測定法シリーズ18, 「熱ルミネセンス線量計を用いた環境γ線量測定法」(1990)