イオンポンプケーブルの放射線劣化調査*

大石 真也*¹・依田 哲彦*¹・谷内友希子*¹・成山展照*¹
建石 剛*²・米原 博人*¹・大熊 春夫*¹

Investigation of Radiation Damage of an Ion Pump Cable

Masaya OISHI*¹, Tetsuhiko YORITA*¹, Yukiko TANIUCHI*¹, Nobuteru NARIYAMA*¹,
Tsuyoshi TATEISHI*², Hiroto YONEHARA*¹ and Haruo OHKUMA*¹^{*1}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI) 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198^{*2}Kobelco Research Institute, INC. 1-5-5, Takatsukadai, Nishi-ku, Kobe 651-2271

(Received November 9, 2005, Accepted January 14, 2006)

The SPring-8 Storage Ring has been operated since 1997, and the integrated electron beam dose was achieved over 2750 A·hr. Electric cables have been irradiated with the high-intense scattered X-ray from photon absorber, and are damaged. Then we measured the absorbed dose along the laying route of radiation damaged ion pump cable, and compared the result with that of various analyses of the damaged cable. As a result, it was confirmed that absorbed dose correlate closely with mechanical strength, and the melting point of the insulator.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の蓄積リングは放射光専用施設として1997年に運転が開始され、現在では年間約5500時間の運転が続いている。偏向電磁石によって8 GeVの電子から放射される放射光は数～数十 keV のエネルギーのX線が主体である。実験に用いない放射光は放射光受光体（アブソーバ）により吸収され、そこから強い散乱X線が発生する。この散乱X線が蓄積リング内の機器、特にケーブルの絶縁体に対し損傷を与えている。その1つとして、2004年末頃から過電流による異常を発生するイオンポンプが始め、絶縁体がエチレンテトラフルオロエチレン（ETFE）の高圧用ケーブルの絶縁不良が原因であることがわかった。放射線（散乱X線）による損傷を疑い、線量分布測定とケーブルの損傷調査を実施した。その結果、線量とケーブル絶縁体の機械的強度等の劣化の程度によい一致があることが確認できた。

2. 放射線分布測定

SPring-8 の蓄積リングの真空系¹⁾はアルミ製アンテナ・チェンバーを用いて構成されている。偏向電磁石で発生する放射光の大部分は局所的に配置された水冷のアブソーバにより吸収され、後方への熱的影響を遮られる。このため、アブソーバで発生する散乱X線は局部的に高線量となる。従って、ケーブルに照射される散乱X線の線量も一様ではなく、場所により大きく異なる。今回、そのようなアブソーバの一つである偏向電磁石から約7 m下流に位置するAB3と呼ばれるアブソーバ近傍に敷設されているイオンポンプケーブルについて調査を行った。

ケーブルに照射される散乱X線は一様でないため、絶縁

劣化を発生したイオンポンプケーブルのルートに沿って、放射線の線量分布測定を実施した。測定にはISP Technologies INC. の線量計 GafChromic HD-810を用いた。HD-810の特長^{2,3)}は、SPring-8の放射光の中心エネルギー領域である10～100 keVに対する応答がほぼフラットであること、ダイナミックレンジが10 Gy～100 kGyと広く、また高線量までの測定が可能なこと、フィルムシート状の線量計で切断して用いることもできることが挙げられる。今回のようにケーブルルートに沿って線量レンジの広い放射線線量を隙間無く測定するためには、上記特長を持ったHD-810線量計は有効であった。2004年11月22日から12月24日まで蓄積リング内にHD-810線量計を設置、蓄積電子の積分電流換算で約72 A·hrに相当する期間の線量測定を実施した。取り出した線量計は専用のスキャナーにかけ吸光度を読み取り、照射前後の吸光度の変化量を吸収線量に換算した。今回測定した期間の積分電流72 A·hrと運転開始から2004年末までの積分電流2448 A·hrとの比から、運転開始以来の積算線量は測定した吸収線量の34倍であると仮定した。

3. ケーブルの損傷調査

2章で線量分布を測定したところに敷設されていた絶縁劣化を起こしたイオンポンプケーブルについて、外観・断面観察、絶縁抵抗測定、引張試験、曲げ試験、硬度測定、フーリエ変換赤外分光分析（FT-IR）、示差走査熱量分析（DSC）の調査を行った。調査は、散乱X線が比較的多い12カ所と、ほとんど照射されない2カ所に敷設された計14部位の試料について行った。

引張試験は、劣化と絶縁体の引張強さと伸びの関係を明らかにするため実施した。外側シールド線を除去後、30 mm長さに切断したものをを用いて行い、つかみ長さは10 mm、引張速度は10 mm/minとした。

曲げ試験は、絶縁体の曲げによる破壊特性を評価するため、三点曲げ試験を行った。曲げ半径は5 mm、曲げ荷重（最高荷重）を測定し、曲げ試験後の絶縁体の割れ状態をビ

* 平成17年11月9日 第46回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 財高輝度光科学研究センター（〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1）^{*2} ㈱コベルコ科研（〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5）

デオマイクロスコープで観察した。

絶縁体の劣化と硬度の関係を調査するため、デュロメータ（タイプD）を用いて硬度測定を行った。

フーリエ変換赤外分光分析（FT-IR）は、絶縁体の劣化と結合状態の比較を行うために実施した。

絶縁体の劣化と融点および熱量の関係を評価するため示差走査熱量分析（DSC）を実施した。測定温度は室温から350℃、昇温速度10℃/min、雰囲気はアルゴン（流量50 ml/min）、試料重量約10 mg、リファレンスはアルミナで行った。

4. 調査結果

調査結果をTable 1にまとめた。Table 1は14の試料を積算線量の順に並べた。なお、試料番号6-1と6-2は放射線がほとんど照射されない場所のものである。Fig. 1(a)とFig. 1(b)、Fig. 2には比較のためにこれらの試料に対する各測定データを積算線量1 kGyの位置に示した。

外観と絶縁抵抗測定の結果、ケーブルの絶縁不良は、絶縁体が折れることによる芯線とシールド線間の放電の発生によるものとわかった。積算線量が100 kGyを超えるケーブルは、比較的容易に手で折ることができた。また、断面観察の結果、積算線量で100 kGyを超える試料は白色のETFE絶縁体が透明になる傾向が観察された。

引張試験の結果をFig. 1(a)に、曲げ試験と硬度測定の結果をFig. 1(b)に示す。積算線量が多い試料ほど引張強さと伸び、曲げ荷重が低下した。特に積算線量が100 kGyを超えると顕著に低下している。積算線量17 kGyでの曲げ荷重と伸びが特異的に低下している結果となった。ここは、試料位置が3 cm ずれるだけで積算線量が約70 kGyになる線量の

変化の激しい位置であった。そのため、線量計のケーブルに対する設置（相対位置）誤差、劣化調査試料の採取位置の精度により結果が大きく変わると考えられる。実際に照射されていた線量は曲げ荷重と伸びが低下していることから17 kGyより大きかったと考える。積算線量221 kGyのデータも曲げ荷重と引張強さに相反する傾向が見られるが、ここも線量が場所により大きく変わるところであるため、試料採取位置のズレによる劣化の差の影響が大きいと考える。積算線量が50 kGyまでは機械的強度はほとんどバラツキの範囲内で劣化は見られない。積算線量が100 kGyを超えると、顕著に劣化が進行すると言える。積算線量が100 kGyを超えた試料は曲げ試験後に割れが生じており、これは、取り扱いによっては絶縁体に割れを発生させ、絶縁不良を起こすことを示している。

なお、電線要覧⁴⁾でETFEの使用可能線量を 1×10^7 R（空気の吸収線量で88 kGy）としている。今回の結果も100 kGyあたりで急激に上記の機械強度が低下していることから同等の結果と言える。

Fig. 1(b)に示す硬度測定の結果は、積算線量の増加に対しわずかに硬度が増しているようにも見えるが、他の機械強度特性に比べるとその変化（相関）は顕著ではなく、放射線劣化との関係は明確でない。

フーリエ変換赤外分光分析（FT-IR）の測定の結果、C-H結合の伸縮振動ピークが観察された試料と観察されなかった試料があったが、積算線量との相関は認められなかった。

示差走査熱量分析（DSC）の結果を、Table 1とFig. 2の融解開始温度、融点、融解熱量として示す。積算線量の高い

Table 1 Results of various analyses of damaged cable. Integrated dose are calculated by the ratio of the integrated electron beam dose during this experiment to that of total storage ring operation.

No	Visual test	Radiation measurement		Tensile test		Bend test		Hardness	FT-IR	Differential scanning calorimeter		
	Color of insulator cross section	Measured dose (Gy)	Integrated dose (kGy)	Tensile strength (N)	Elongation (mm)	Bend force (N)	State after bend test	Hardness	C-H Stretching Vibration	Melting point (°C)	Start point of melting (°C)	Heat of fusion (J/g)
5-1	transparency	8800	299	228	4.6	34	breaking	64	observed	263	242	62.1
1-3	transparency	8100	275	234	11.5	38	large crack	66	observed	261	235	60.5
1-2	transparency	6500	221	135	11	79	crack	66	not observed	263	242	60.6
1-1	transparency	5000	170	270	19.5	31	breaking	65	observed	263	242	60.5
2-1	transparency	4000	136	227	4	30	breaking	63	not observed	260	234	65.1
2-2	transparency	3000	102	332	19.4	41	large crack	65	not observed	263	241	61.8
3-1	white	1600	54	765	54.9	124	without crack	64	observed	266	253	54.9
5-2	white	1300	44	755	103	119	without crack	65	not observed	266	253	53.6
3-2	white	600	20	774	67.6	128	without crack	63	not observed	267	255	50.5
2-3	white	500	17	729	12.8	60	large crack	64	not observed	266	249	57.8
3-3	white	200	6.8	767	55.7	125	without crack	64	not observed	268	256	48.1
5-3	white	100	3.4	786	89.3	131	without crack	62	observed	268	257	49
6-1	white	—	—	781	82.1	135	without crack	64	observed	268	257	45.1
6-2	white	—	—	795	110.6	130	without crack	61	not observed	267	256	47.1

(a)

(b)

Fig. 1 (a) Tensile strength and elongation of ETFE insulator versus integrated dose. Tensile strength and elongation decrease remarkably over 100 kGy of integrated dose. (b) Bend force and hardness of ETFE insulator versus integrated dose. Bend force decrease remarkably over 100 kGy of integrated dose.

試料は融解開始温度と融点が低下し、融解熱量が増加した。積算線量の高い部分では、低融点の成分が増加していると考えられ、絶縁体の分子結合が切れて低分子化合物が増加したと推察される。

5. ま と め

イオンポンプのケーブル敷設ルートに沿った放射線分布を

Fig. 2 Start point of melting, melting point and heat of fusion of ETFE insulator. Start point of melting and melting point decrease, and heat of fusion increase remarkably over 100 kGy of integrated dose.

フィルム状の放射線線量計の GafChromic HD-810 で隙間無く連続的に測定することができた。ケーブル調査の結果、積算線量と絶縁体機械的強度である引張強さ、伸び、曲げ荷重と相関が見られた。また絶縁体の融解開始温度、融点、融解熱量とも相関が観察された。積算線量が 100 kGy を超すと ETFE ケーブルの機械的強度の劣化が顕著となり、絶縁体が折れやすくなっていることがわかった。折れたところで芯線とシールドケーブル間で放電が発生することにより、イオンポンプの過電流異常が発生したものとする。現在、SPring-8 蓄積リングの 1 年間の積分電流増加は 500 A・hr 程度であり、今回の調査結果によれば、イオンポンプのケーブルは年間 60 kGy に達する線量を被爆する部位があることになる。ケーブルを新しくしても 2 年で再交換の必要性があることを示している。実際の調査では、今回報告した以外の全配置のイオンポンプケーブルの線量を測定し、ケーブル交換の必要部位、および遮蔽の必要部位を把握した。

〔文 献〕

- 1) 渡邊, 佐伯, 正木, 鈴木, 谷内, 野田, 前野, BE, 大熊: 真空, **42** (1999) 535.
- 2) American Association of Physics in Medicine: Medical Physics, **25** (11), Nov 1998, pp. 2093-2115.
- 3) N. Nariyama: Applied Radiation and Isotopes, **62** (2005) 693-697.
- 4) 三菱電線工業: 電線要覧, 1991, p. 1208.