

Optical design of observation system for charge stripping foil

Yasuhiro Takeda^{1,A)}, Jyunichiro Kamiya^{B)}

A) High Energy Accelerator Research Organization
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

B) Japan Atomic Energy Agency
 2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

Abstract

We have investigated the observation method that can be used under the high radiation environment. However, there is no specific technology to satisfy characteristics of optics due to radiation degradation occurred in a short time. Therefore we started to develop a new observation system that has durability more than 1-MGy of radiation dose and 200 μ m resolution at the place 10m away from an object. This system is an application of the principle of the telescope. Focusing under the no radiation. (The lens is not used)

We have designed optics to obtain the $\lambda/16$ resolution. (λ = wave length 633nm) Moreover, We have examined the durability of optical parts using gamma-ray emitted from ⁶⁰Co, and adopted to use it(Lens: Sapphire or Quartz, Mirror: Rh or TiO₃ multiple coating). We designed the optical system to obtain high resolution.

荷電変換膜観察のための光学設計

1. はじめに

近年、加速器、イオン源及びその周辺機器等の格段の進歩により大電流化が進み、機器周辺の放射線環境が一段と過酷な状況になってきた。この環境下での機器の状態の常時観察は安全運用や運転効率の面で非常に重要となってきた。特に長時間ビームを照射し、変形を起こす荷電変換膜の観察はビームの安定供給のためにも必要不可欠である。

そこで、我々は高放射線環境下でも使用できる観察方法の調査を行ってきた。しかし、いずれも短時間に放射線劣化が起こり、頻繁に部品を交換する必要が生じるため、現状では満足できる確立した技術はない。このため、放射線劣化の少ない観察方式の新しい手法が要求される。我々は 1) 集積線量 1 MGy以上の耐久性を持ち、2) 被写体から 10m離れた場所で 200 μ mの分解能を持つ新しい観察系の製作と実現を図ることを目標に調査開発を始めた。

2. 高放射線環境下での観察方式の比較

現在、諸方面で開発中の高放射線環境下で使用する観察方式の代表例と現状における問題点を示すと：

耐放射線 CCDカメラによる直視

問題点：白黒画像。累積線量が約 1×10^6 Gy で約 CCD素子に放射線劣化が起き、画像が乱れる。

耐放射線石英ファイバースコープ観察

問題点：最小画素径が限られており、画質が悪い。線量率 8.7×10^2 Gy/h で照射した場合、2 2 時間後には増加損失が 300 dB/km になる。

ペリスコープ観察

問題点：リレーレンズで画像を結像しながら伝送していくため、詳細な光学設計が必要。

放射線環境下にレンズを置く構成の場合、放射線による着色（ブラウニング）が起き、透過効率が著しく悪くなる。

この3方式では、いずれも短時間に放射線劣化が起こり、部品を頻繁に交換する必要が生じる。結果として、機器の運転効率の著しい低下とその部品交換時における放射線被曝が避けられない。

3. 新しい観察方式の開発

3.1 設計概念

放射線環境下において長時間観察の実現のために問題点を見直した結果、1) 放射線損傷が大きく、着色を起こすレンズ等のガラス材と 2) p n 反転を起こす CCD 素子などの半導体類を放射線環境下の光路上に置くべきでないという結論に達した。そこで、放射線損傷の起こしやすい材質を放射線環境下に全く入れないやり方で設計を行うこととした。光路には放射線に強い金属などのミラーのみを配置し（真

¹ E-mail: yasuhito.takeda@kek.jp

空仕切り窓はのぞく)、放射線防護壁の外に放射線の影響を受けやすいレンズやCCDカメラなど配置したシステムを考案した。これは、放射線環境下外でのみ画像を結像させる望遠鏡の原理を応用したシステムである。(図1)

しかし、この実現のためには1)ミラーの放射線劣化、2)ミラーの面精度、3)観察部レンズの面精度を検討する必要がある。

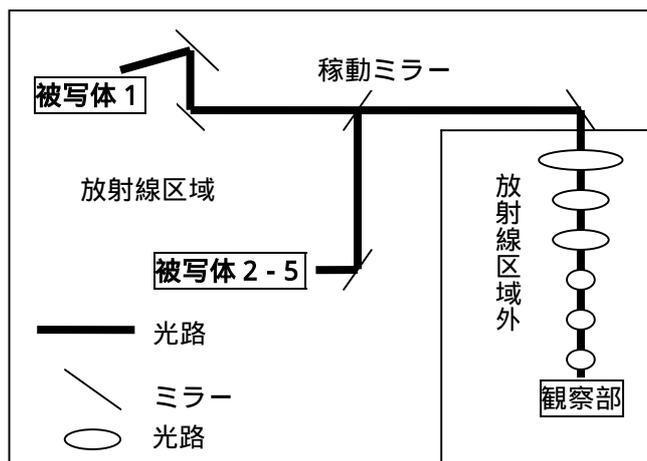


図1 高鮮明度観察システムの光路概略

3.2 光学設計

この光学システムで分解能や鮮明度を高めるためにはレンズやミラーの面精度を高精度に上げることが重要である。したがって、現状の“職人”と言われる技術である $\lambda/16$ の面精度を目標とした。(注: 光の波長 一般的に633nm) また、色収差の補正は、観察部付近でAPOレンズによる補正を行うことにした。この構造を取り入れたことで収差の全くないシステムの設計ができた。これらの条件をもとに光路計算を行ったところ、10m先で200 \cdot mの十分な分解能が得られることを確認した。また、このシステムでは、望遠鏡の原理を応用しているため、1)ミラーの切り替えとピント調整のみで1つの観察部から多数の違った被写体(5被写体)を見ることが出来る、2)観察部を駆動させることでズームの機能を加えることに成功した。

4 光学部品の面精度

面精度は、解像度に顕著に影響するため、非常に重要である。通常的光学部品の面精度は悪く、我々の望む分解能を得ることは出来ない。そこで、 $\lambda/16$ の精度まで上げる研磨技術の確立を行った。我々は研磨技術の最適化を図ることでその実現を目指し、現在、目標の $\lambda/16$ の面精度を達成した。(図2)

5 構成部品の耐放射線性

この光学系には放射線環境下の光路に1)ミラーを



図2 $\lambda/16$ の面精度に仕上がったガラス

配置し、真空と大気の仕切り窓に2)ガラス窓を使用する。この為、放射線劣化の少ない材質を使用することを基本として製作しなければならない。

5.1 線照射試験

放射線による材質の劣化、反射率の低下やコーティング材の劣化を日本原子力研究開発機構・高崎研で線照射試験を行った。1)ミラーはSiCやSiなどのバルク材料でミラーを製作した場合とZerodur等の基板に金属(Al, Ag等)コーティングをした場合、さらにその上に酸化防止膜SiO₂やMgF₂などをコーティングした場合の26サンプル(表1-1)、2)ガラス窓ではサファイアや合成・溶融石英、BK7などの6サンプル(表2-1)の放射線劣化度を系統的に測定して、反射率や透過率の変化や材質などの影響を比較評価しながら放射線環境下での最適材料を選択する。目標は集積線量1MGyである。

5.2 照射試験結果

今回、約600kGyまで照射試験を行った。ミラーの照射結果を表1にガラス窓の照射結果を表2に示す。

1)ミラーでは、全ての材質で反射率に大きな変化は見られなかった。しかし、AlとAgをコーティングしたものは、表面に茶色い反転や一部に白い曇りが見られた。RhやTiO₂+SiO₂多層膜は表面が安定しており、反射率にも変化が見られなかった。

2)ガラス窓では、明らかに素材の差が見られた。特に通常レンズ素材としているBK7は透過率が5%以下までに落ち込んだ。しかし、サファイアや石英には透過率の変化は見られなかった。

6 まとめ

放射線照射試験の結果より、光学部品のある程度の選択目処が付いた。今後は、さらに累積線量1M

Gyまでの照射試験を行う。その後、メンテナンスのしやすさや、コーティング材が剥離した場合の処理等を総合的に考え最終的な材料選択を行っている予定である。

表1-1 ミラー材サンプル

Al+SiOコーティング	Al+MgF ₂ コーティング	Niコーティング	Agコーティング	Ag+SiOコーティング
Ag+MgF ₂ コーティング	Cr+Auコーティング	Auコーティング	Cr+SiOコーティング	Crコーティング
Rhコーティング	Moコーティング	(TiO ₂ +SiO ₂) ¹⁵ コーティング	Si基板研磨	SiC基板研磨

表1-2 ミラー材の反射率の変化(代表的なもののみ記す)

サンプルナンバー	サンプル名	大きさ	照射回数	照射量 (Gy)	透過率 (%)														波長 (nm)	
					400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660		680
M-1	Al+SiOコーティング	30x30x5	0	0	32.5	37	41	45	49	53	56	59	62	64	66.5	68	70	71	72	73
			1	100	31.73	36.34	40.91	45.25	49.43	53.2	56.66	59.7	62.4	64.67	66.62	68.27	69.72	70.95	71.89	72.88
			2	250	31.14	35.91	40.39	44.81	49.02	52.86	56.34	59.38	62.14	64.5	66.48	68.19	69.55	70.82	71.82	72.74
			3	600	29.59	34.33	39.07	43.64	47.95	51.88	55.47	58.73	61.5	63.92	65.99	67.72	69.24	70.48	71.61	72.5
			変化量 (%)				8.953846	7.216216	4.707317	3.022222	2.142857	2.113208	0.946429	0.457627	0.806452	0.125	0.766917	0.411765	1.085714	0.732394
M-5	Ag+MgF ₂ コーティング	30x30x5	0	0	81	86	89	91	92	93	94	95	95.5	95.8	96	96.2	96.8	97	97.1	97.2
			1	100	81.22	85.86	88.61	90.62	91.96	93.02	93.81	94.45	94.96	95.39	95.65	96	96.25	96.57	96.66	96.93
			2	250	70.67	77.24	81.43	84.42	86.57	88.27	89.39	90.4	91.17	91.86	92.36	92.91	93.24	93.61	94.01	94.23
			3	600	65.39	71.62	75.83	78.86	81.32	83.15	84.78	86.32	87.6	88.69	89.6	90.46	91.13	91.79	92.34	92.81
			変化量 (%)				19.2716	16.72093	14.79775	13.34066	11.6087	10.5914	9.808511	9.136842	8.272251	7.421712	6.666667	5.966736	5.857438	5.371134
M-11	Cr+Auコーティング	30x30x5	0	0	40.5	42	43	43	44.5	54	67	78	85	89	91	93	94	95	95.8	96
			1	100	40.61	42.53	43.4	43.64	45.28	54.85	68.83	78.78	84.81	88.28	90.55	92.08	93.16	94.09	94.6	95.02
			2	250	40.57	42.31	43.08	43.23	44.83	54.45	68.43	78.34	84.35	87.86	90.21	91.81	92.95	93.81	94.28	94.68
			3	600	40.96	42.67	43.47	43.6	45.3	54.98	69.28	79.06	84.77	88.18	90.28	91.77	92.89	93.7	94.32	94.56
			変化量 (%)				-1.1358	-1.59524	-1.09302	-1.39535	-917.978	-1.81481	-3.40299	-1.35897	0.270588	0.921348	0.791209	1.322581	1.180851	1.368421
M-17	Rhコーティング	45x45x5	0	0	64	64	64	64.5	65	66	67	67.8	68.5	69	70	70.8	71.3	72	73	73.8
			1	100	63.23	63.39	63.63	64.07	64.78	65.6	66.39	67.25	68.07	68.88	69.71	70.46	71.23	72.02	72.73	73.37
			2	250	63.1	63.24	63.32	63.71	64.29	65.08	65.83	66.59	67.36	68.05	68.77	69.51	70.25	70.92	71.6	72.25
			3	600	63.19	63.45	63.71	64.12	64.87	65.59	66.41	67.27	68.05	68.91	69.63	70.38	71.19	71.9	72.66	73.32
			変化量 (%)				1.265625	0.859375	0.453125	0.589147	0.2	0.621212	0.880597	0.781711	0.656934	0.130435	0.528571	0.59322	0.154278	0.138889
M-21	(TiO ₂ +SiO ₂) ¹⁵ コーティング	45x45x5	0	0	94	96.5	97	97.8	98.6	98.5	98	98	98.2	98.4	98.5	97.2	97	96	93.5	80
			1	100	94.74	97.03	97.07	98.54	99.44	99.25	98.57	98.2	98.8	99.22	98.73	97.5	96.86	95.92	94.32	82.51
			2	250	94.43	96.91	96.68	98.24	99.06	98.99	98.22	97.72	98.07	98.54	97.89	96.74	95.91	94.66	93.18	81.15
			3	600	95.14	97.98	98.04	99.33	100	100	99.57	99.01	99.65	100	99.75	98.79	98.63	97.3	95.84	85.04
			変化量 (%)				-1.21277	-1.53368	-1.07216	-1.56442	-1.41988	-1.52284	-1.60204	-1.03061	-1.47658	-1.62602	-1.26904	-1.6358	-1.68041	-1.35417
M-23	Si基板研磨	20x5	0	0	39	36	34.5	33.5	33	32	31	30.5	30	29.8	29.5	29	29	30	29.5	29.5
			1	100	45.58	42.95	41	39.64	38.63	37.74	36.94	36.32	35.77	35.35	35.02	34.66	34.37	34.19	34.01	33.8
			2	250	49.4	46.58	44.43	42.96	41.4	40.91	40.14	39.5	39.02	38.53	38.14	37.88	37.58	37.37	37.2	37.08
			3	600	50.33	47.45	45.35	43.86	42.62	41.64	40.35	40.22	39.67	39.21	38.84	38.53	38.3	38	37.87	37.72
			変化量 (%)				-29.0513	-31.8056	-31.4493	-30.9254	-29.1515	-30.125	-30.1613	-31.8689	-32.2333	-31.5772	-31.661	-32.8621	-32.069	-26.6667
M-24	SiC基板研磨	25x5	0	0	22.5	22.2	22	21.8	21.6	21.5	21.3	21.2	21.1	21	21	21	21	21	21	21
			1	100	19.12	18.91	18.77	18.58	18.41	18.31	18.24	18.2	18.11	18.07	18.08	18.04	18.04	17.91	18.14	18.18
			2	250	15.61	15.37	15.3	15.19	14.93	14.89	14.87	14.8	14.78	14.76	14.76	14.76	14.76	14.85	14.77	14.85
			3	600	20.86	20.59	20.36	20.17	19.9	19.82	19.73	19.67	19.64	19.59	19.53	19.56	19.58	19.38	19.55	19.62
			変化量 (%)				7.288889	7.252252	7.454545	7.477064	7.87037	7.813953	7.370892	7.216981	6.919431	6.714286	7	6.857143	6.761905	7.714286

表2-1 ガラス窓材サンプル

サファイア	熔融石英	CaF ₂	BK7	スライドガラス	合成石英
-------	------	------------------	-----	---------	------

表2-2 ガラス窓の透過率の変化(代表的なもののみ記す)

サンプルナンバー	サンプル名	大きさ	照射回数	照射量 (kGy)	透過率 (%)														波長 (nm)		
					400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660		680	700
W-1	サファイア	25x2mm	0	0	85.45	85.52	85.48	85.55	85.61	85.69	85.75	85.79	85.78	85.99	85.87	86.58	86.18	86.17	86.2	86.12	
			1	100	84.23	84.54	84.71	84.9	84.99	85.14	85.34	85.44	85.57	85.63	85.72	85.94	85.84	86.01	86.04	85.98	
			2	250	84.23	84.54	84.71	84.9	84.99	85.14	85.34	85.44	85.57	85.63	85.72	85.94	85.84	86.01	86.04	85.98	
			3	600	84.52	85.41	85.4	85.3	85.34	85.26	85.35	85.58	85.64	85.68	85.86	85.9	86.02	85.95	85.98	86.24	
			変化量 (%)				1.088356	0.128625	0.093589	0.292227	0.315384	0.501809	0.466472	0.244784	0.163208	0.360507	0.011646	0.785401	0.185658	0.255309	0.25522
W-2	熔融石英	50x2mm	0	0	93.47	93.1	92.94	93.05	93.3	93.14	93.19	93.27	93.17	93.38	93.32	93.6	93.51	93.34	93.58	93.46	
			1	100	92.57	92.76	92.97	93.16	93.12	93.14	93.31	93.2	93.29	93.31	93.21	93.28	93.3	93.34	93.34	93.41	
			2	250	93.14	93.02	93.05	93.18	93.02	93.18	93.17	93.31	93.22	93.22	93.22	93.22	93.22	93.3	93.37	93.32	93.35
			3	600	92.55	93.37	93.22	93.18	93.15	92.87	93	93.09	93.04	93.08	93.06	93.11	93.1	93.22	93.19	93.41	
			変化量 (%)				0.984273	-0.290011	-0.30127	-0.13971	0.160772	0.289886	0.203885	0.192988	0.13953	0.321268	0.278611	0.523504	0.438456	0.128562	0.416756
W-4	BK7	25x3mm	0	0	90.03	90.11	90.09	90.26	90.12	90.2	90.45	90.38	90.39	90.29	90.36	90.31	90.35	90.41	90.23	90.27	
			1	100	4.97	6.81	9.03	11.63	14.62	17.73	20.9	23.94	26.69	29.12	31.42	34.16	37.64	42.54	48.32	54.48	
			2	250	1.21	1.93	2.92	4.31	6.12	8.25	10.65	13.14	15.46	17.57	19.69	22.1	25.46	30.35	36.52	43.76	
			3	600	2.91	4.4	6.18	8.31	10.75	13.36	16.12	18.85	21.5	23.86	26.22	28.95	32.59	37.61	43.73	50.63	
			変化量 (%)				96.76774	95.11708	93.14019	90.79326	88.07146	85.18847	82.178	79.14362	76.21418	73.57404	70.98274	67.94375	63.92916	58.40062	51.53497
W-6	合成石英	25x2mm	0	0	93.5	93.2	93	93	93.3	93.4	93.2	93.3	93.2	93.4	93.3	93.6	93.5	93.2	93.1	93.5	
			1	100	92.74	92.83	93.04	93.03	93.04	93.06	93.15	93.19	93.15	93.16	93.14	93.21	93.24	93.2	93.25	93.34	
			2	250	93.03	92.84	92.93	93.05	93.01	93.06	93	93.2	93.1	93.11	93.21	93.17	93.2	93.3	93.21	93.28	