

ベリリウム反射体要素欠陥評価法に関する検討

Research of Flaw Assessment Methods for Beryllium Reflector Elements

柴田 晃 伊藤 正泰 竹本 紀之 中司 雅文
小原 浩史 児玉 光弘 谷本 政隆 土谷 邦彦

Akira SHIBATA, Masayasu ITO, Noriyuki TAKEMOTO, Masafumi NAKATSUKA
Hiroshi OHARA, Mitsuhiro KODAMA, Masataka TANIMOTO and Kunihiko TSUCHIYA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

February 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

， ， ， ，
， ，

(2011 12 8)

Research of Flaw Assessment Methods for Beryllium Reflector Elements

Akira SHIBATA, Masayasu ITO, Noriyuki TAKEMOTO, Masafumi NAKATSUKA
Hiroshi OHARA , Mitsuhiro KODAMA , Masataka TANIMOTO
and Kunihiko TSUCHIYA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 8, 2011)

Reflector elements made from metal beryllium is widely used as neutron reflectors to increase neutron flux in test reactors. When beryllium reflector elements are irradiated by neutron, bending of reflector elements caused by swelling occurs, and beryllium reflector elements must be replaced in several years.

In this report, literature search and investigation for non-destructive inspection of Beryllium and experiments for Preliminary inspection to establish post irradiation examination method for research of characteristics of metal beryllium under neutron irradiation were reported.

Keywords : JMTR, Reflector Element, Beryllium, Non-destructive Measurement

.....	1
.....	2
.....	2
.....	3
.....	4
.....	5
.....	5
.....	8
.....	8
.....	25
.....	25
..... EMAR	25
.....	27
.....	28
.....	28
.....	29
.....	34
.....	36
.....	37
.....	37
.....	37
.....	38
.....	57
.....	57
.....	57
.....	63
.....	63
.....	63
.....	64
.....	64
.....	65
.....	65

Contents

1. Introduction	1
2. Investigation on Mechanical properties of Irradiated Beryllium.....	2
2.1 Destructive and Non-destructive Method for Evaluation of Mechanical properties	2
2.1.1 Utilization of Ultrasonic Method	3
2.1.2 Utilization of Electrical Resistivity Method.....	4
2.2 Physical Properties of Beryllium for Evaluation of Destructive and Non-destructive Methods	5
2.2.1 Elastic Coefficient of Beryllium	5
2.2.2 Electrical Resistance of Beryllium.....	8
2.2.3 Swelling of Beryllium.....	8
3. Destructive and Non-destructive Methods	25
3.1 Consideration of Post Irradiation Examination Method.....	25
3.1.1 Measuring Principle of Acoustic Characteristics by EMAR.....	25
3.1.2 Experimental method	27
3.1.3 Specimens	28
3.1.4 Texture of Beryllium	28
3.1.5 Elastic Coefficient of Beryllium	29
3.1.6 Sonic Velocity in Beryllium	34
3.2 Measurement of Acoustic Character of Un-irradiated Beryllium	36
3.3 Preparation of Characteristic Evaluation of Un-irradiated Beryllium Specimen.....	37
3.4 Factors of Characters of Beryllium Specimens	37
3.4.1 Effect of Thickness and Figure of Specimen	37
3.4.2 Effect of Texture of Specimen.....	38
4. Consideration of Post Irradiation Examinations.....	57
4.1 Nuclide and specific activity of irradiated beryllium.....	57
4.2 Radioisotope license.....	57
5. Conclusions	63
5.1 Literature search.....	63
5.2 Destructive and Non-destructive Methods	63
5.3 Post Irradiation Examination Method	64
5.4 conclusions	64

Acknowledgements	65
References	65

This is a blank page.

[1][2]

JMR

JMR

H

98.5%
S-200F

S-200F Be
50

()

JMR 1968

2006 38

5 [3]

JMR

2

JMR

2011

5

2

JMR

(Be)

(1)

(2) /

21

JIS ASME

(1)

X

X

(2)

AE

(3)

(4)

(5)

[4]

(1)

(2)

(3)

(4)

(1) (3) (5)

(2)

(4)

2.1.1

2-1^[4]

EMAT (Electromagnetic Transducer)
acoustic resonance method/EMAR^[5]

(Electromagnetic
Cr-Mo-V
EMAR

^[6] EMAT

2-1

2-2

2-3

5%

/ tr
t/tr=0.5
t/tr=0.5

2-4

t/tr=0.3
t/tr=0.03

()

(2-5)^[7]

EMAT EMAR

^[8]

2-6

2-7

25%

()

()

()

() SUS304(HP) EMAR

()

[9] 2-8 (A/B/C/D

Q 21/Q 16/Q 13/Q 04) A B C

D

EMAR () 2-9

EMAR

EMAR

()

[10] Ti 2-10

(2-11) SUS

(2-12) [11]

2 1 2

(9-43128)

66 (3.5 5.0 × 10²¹cm², E>1MeV)

(²⁹BeO) 60 (12.0 MPa^{1/2} 295K)

[12]

(800 1000) (Max10²¹cm², E>29fJ)

(K) 1.2

/

1.5, 1.6, 1.7, 0.5

[13]

(

DBTT) (290 1.3 × 10²⁴m⁻² E>1MeV) A533B

[14] ()

(thermal controlled)

2-13

2-14

Mn N Cu

2-15

Cu

Cu

Cu

2-16

(3mm ,

0.25mm)

(2-17)^[15]

(2-18)^[16]

Al Si 304

Fe-18Cr-9N

(20.5 dpa

2.3%

0.38×10^8 4.30×10^8 dpa/s)

(2-19)

^[17]

2.2

2.1

()

Be

2.2.1

(1)

Be

(hcp)

(C_j)

^[18]

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{11}-C_{12} / 2 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Be 50%
0.3 0.05
1000K
 C_j

[19]

[18]

99.999% 5× 6× 4mm Be (1.842g/cm³) 6× 6× 6mm
 Be(1.845g/cm³) (Resonant-ultrasound Spectroscopy)

Be (295K) 2-2
 Migliori Fisher 2-3
 Voigt-Reuss-Hill

2-4 (C_j) (S_{ij})

1453K
 Be 99.1wt%

21× 24× 33mm Be

X

300

2-5 2-20 C_{11} C_{33} C_{44} ± 0.25 C_{12}
 ± 0.35 C_{13} ± 0.50(10¹¹dyne/cm²)

2-21

(2) Be

Be () Be

(VP)

S200 D - E

P31664 1cm (/ L/T)

(0001)

2-22

cm

[20]

VP

S200-D - E

2.0 1.8

C

0-35°

(3) Be

[21]

BE

()

Be C

()

S_{ij}

(=cos)

hcp

$$E_{\theta} = S_{44} + (S_{11} - S_{12} - 0.5S_{44})(1 - \gamma^2) + 2(S_{11} + S_{33} - 2S_{13} - S_{44})\gamma^2(1 - \gamma^2) \quad (2-2)$$

Be

C_{ij}

2-6

2-23

C

350GPa

290GPa

ν_{θ}

$$\nu_{\theta} = (E_{\theta} / \rho)^{1/2} \quad (2-4)$$

Be Be- 1.1wt%Cu

Be- 2.4W%Cu

1.848

1.863

1.882g/cm³

2-24

Be

Be

(

)

MRD

MRD=1

MRD=11

MRD

MRD=8

2-25

Be C C 13 15km/s
 13.55km/s [21] MRD MRD=8 2%
 [21]
 Be [21]
 a- c- / / /HP
 MRD 2.6/ 9.9/ 13.2/ 1.44 MRD
 4 20 Be BeO Be
 [21]

2 2 2

295K 3.25μ
 cm^[22] 5.89μ cm [23]
 273K C 3.56μ cm C
 [22] Be (4.2K) (1.2× 10¹⁸cm² E>0.1MeV)
 2μ cm He
 4.2K
 (300K) [24]
 Be

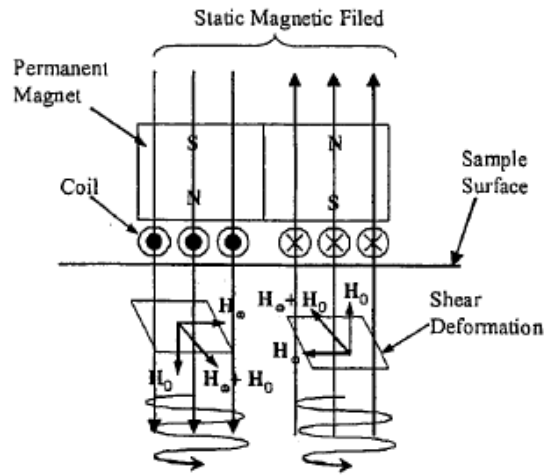
He
 12μ cm/1%He [25]
 411 430 150dpa 0 50dpa
 (IACS) () [26]

Be 2-7 2-23

2 2 3

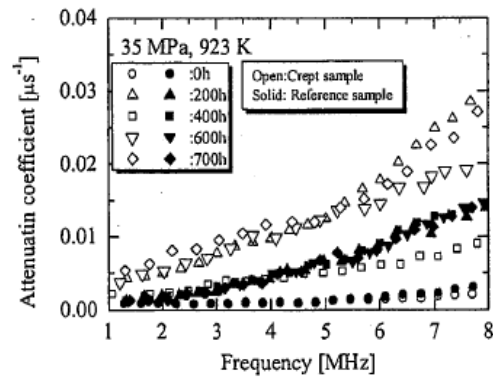
(He) HP Be(TE-56 TE-30 TTP DIP)
 70 1× 10²²cm²(E>0.1MeV)
 V/V 2× 10²²cm²(E>0.1MeV) 0.5% (0.2-0.4%) [27]
 2-24 Be(TE-56 TE-30 TTP DIP) 200 1×
 10²²cm²(E>0.1MeV) V/V (2-25) [21]
 Be dpa 2-24 (1)
 Cu+2Be (IACS) 20 30

(2) (dpa < 50) ()
) ()
)



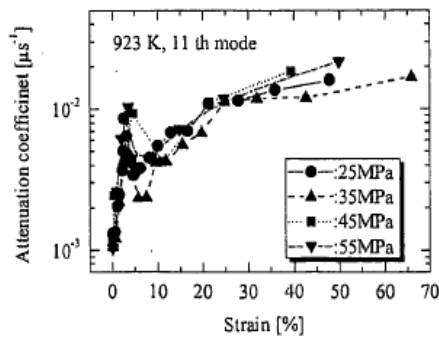
2-1 EMT

[6]



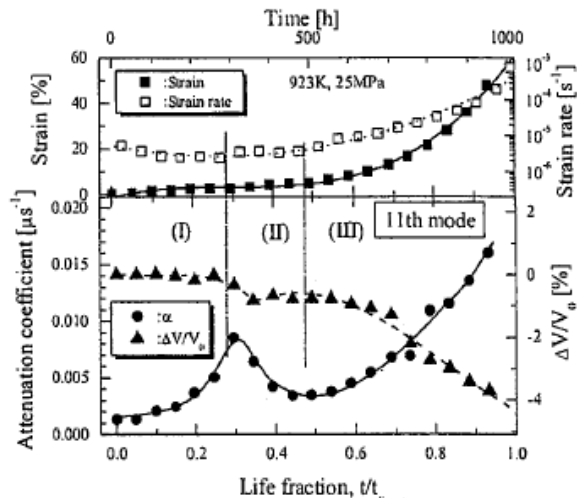
2-2

[6]



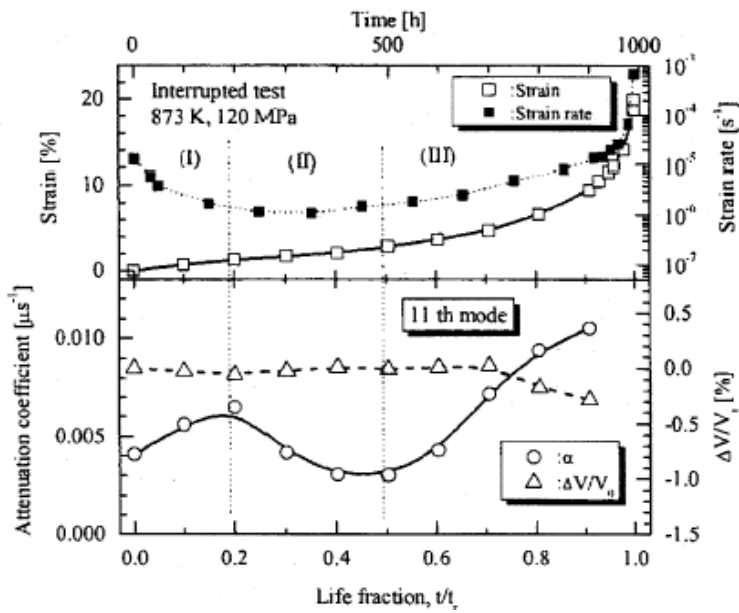
2-3

[6]



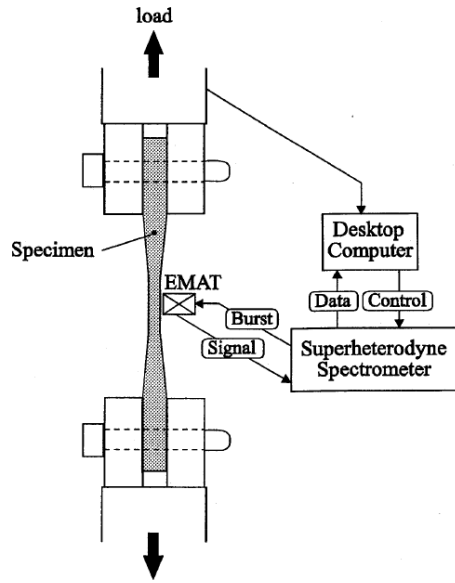
2-4

[6]



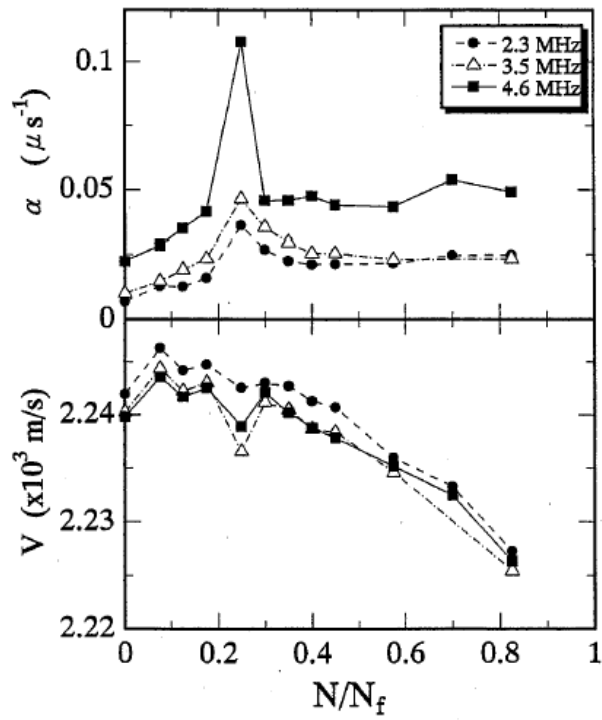
2-5

SUS [7]



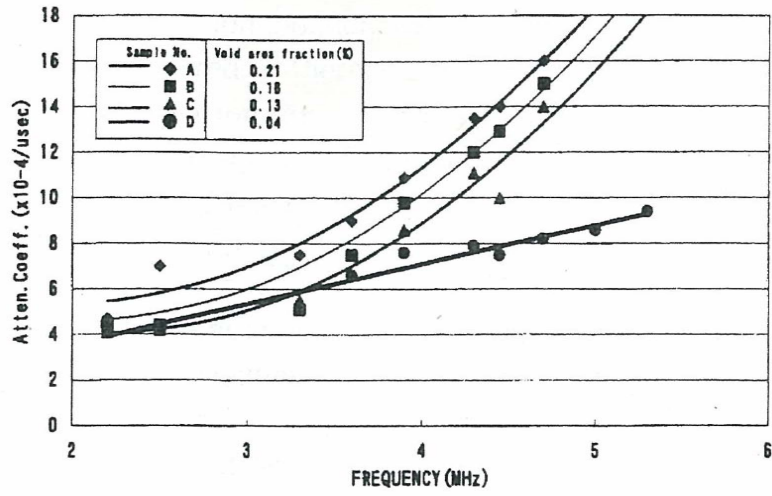
2-6 EMAR

[8]



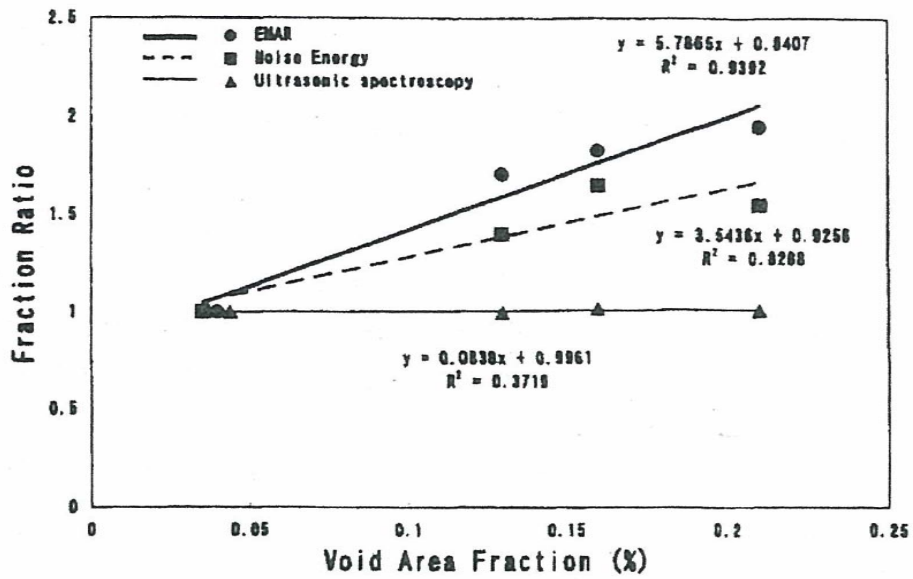
2-7 EMAR

[8]



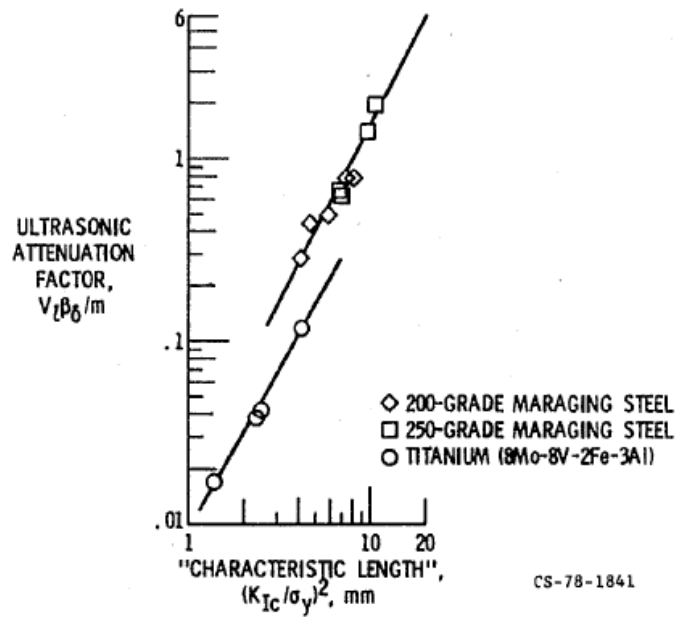
2-8

[9]



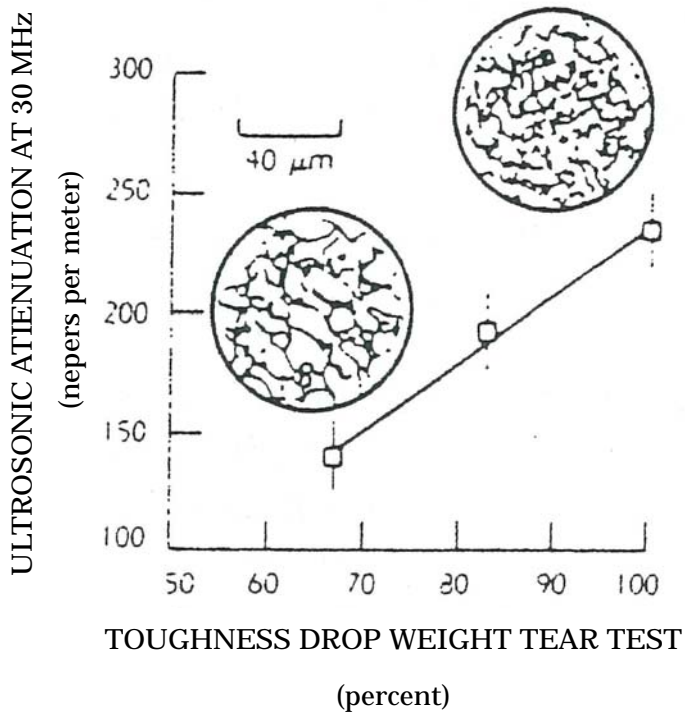
2-9

[9]



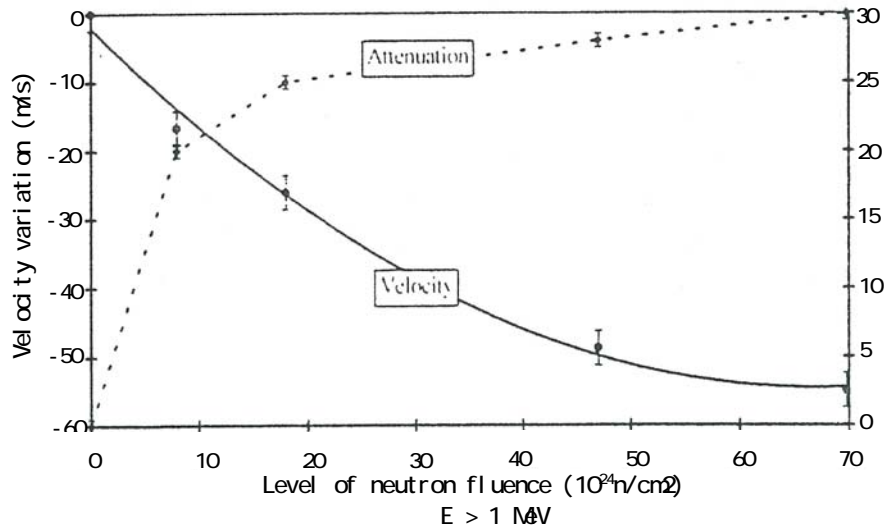
2-10

[10]



2-11 3

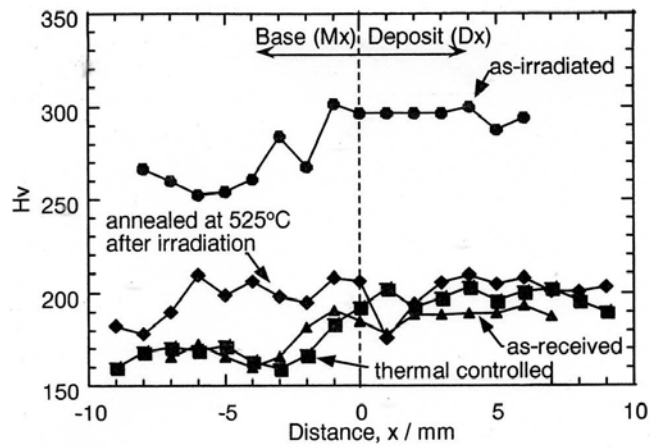
[11]



2-12

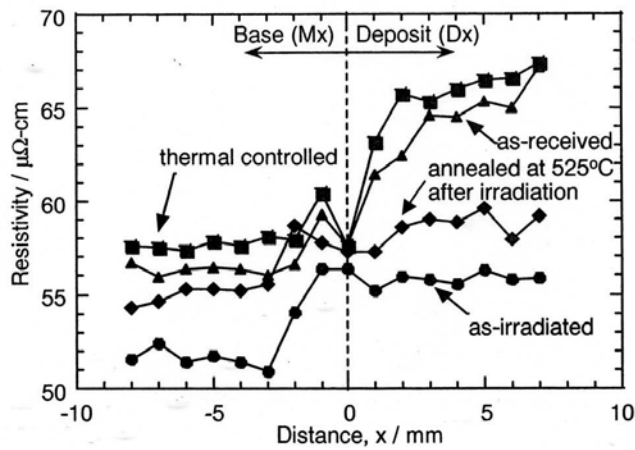
SUS304L

[11]



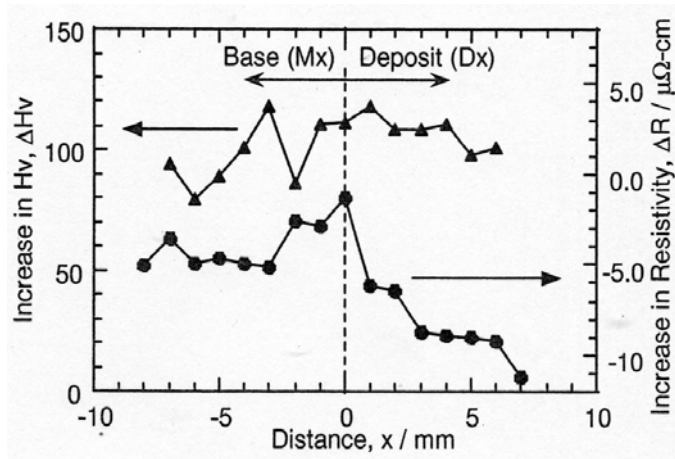
2-13

[14]



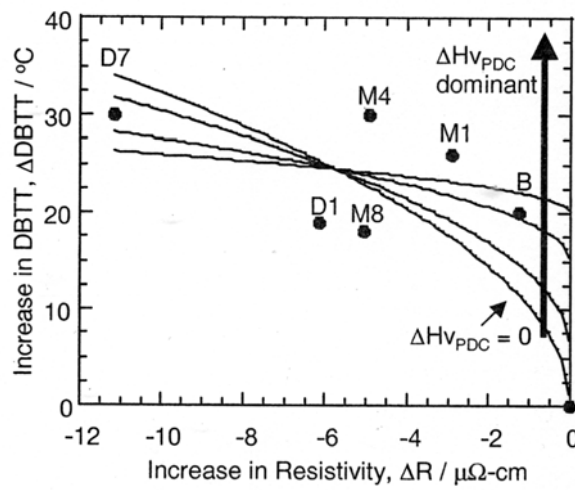
2-14

[14]



2-15

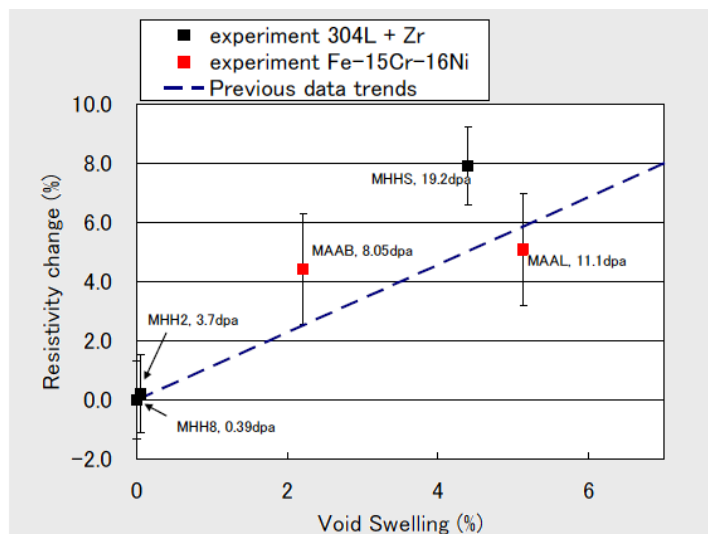
[14]



2-16

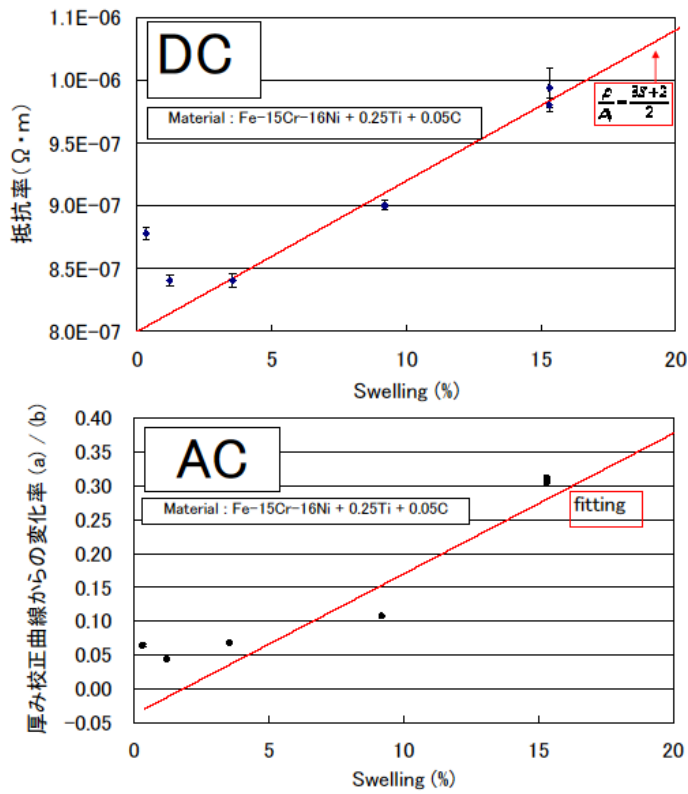
DBTT

[14]



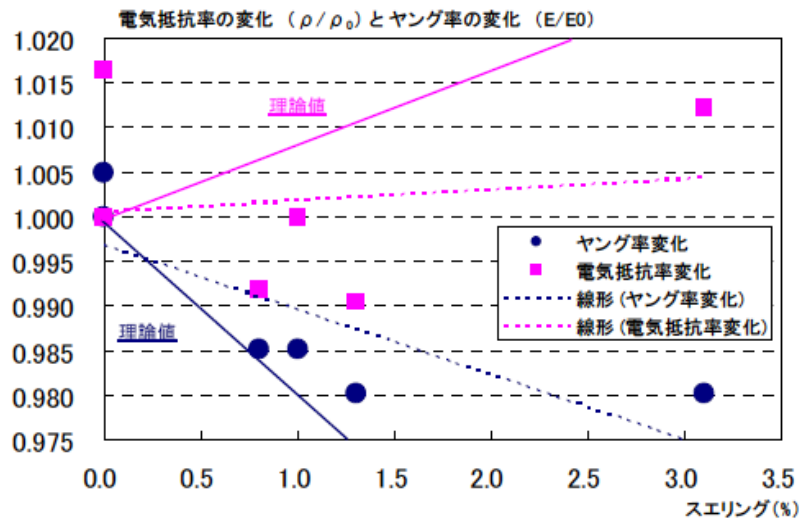
2-17

[15]



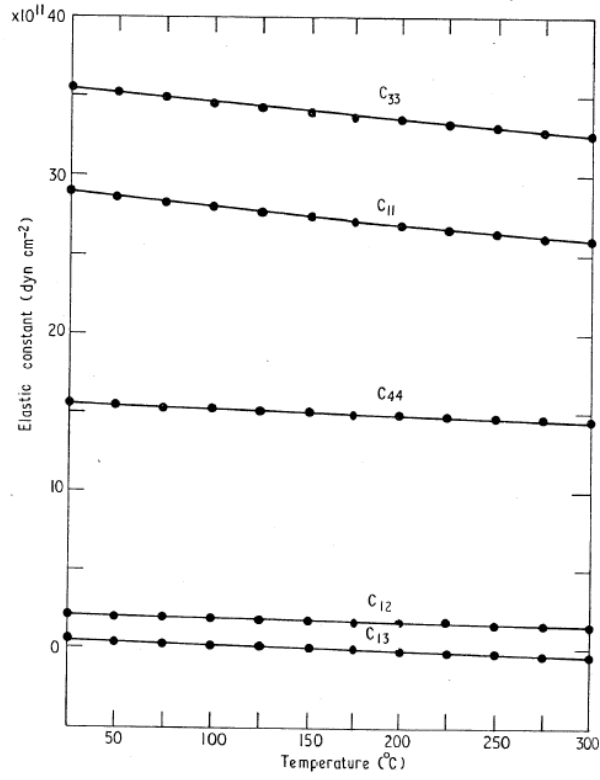
2-18

[16]



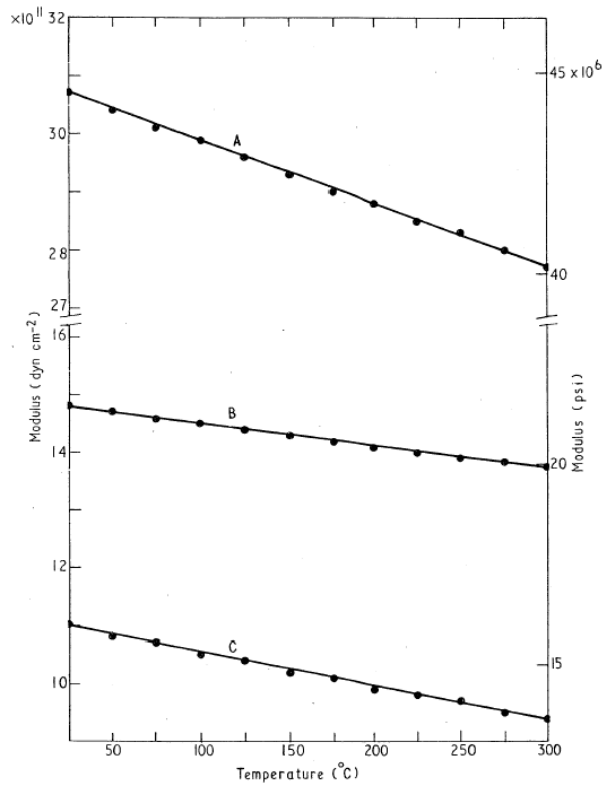
2-19

[17]



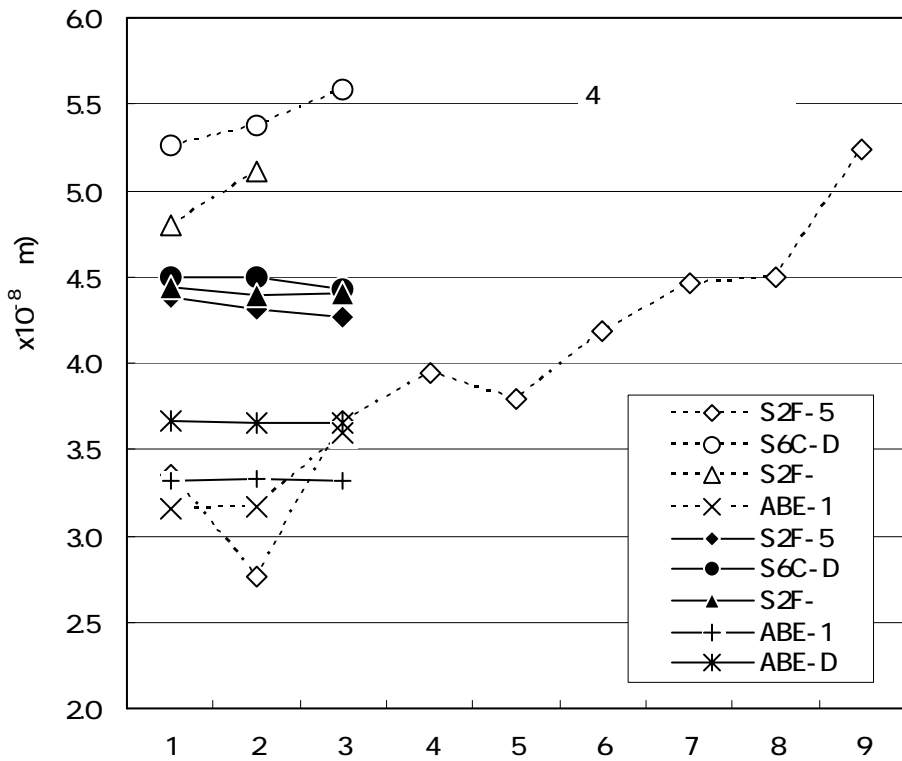
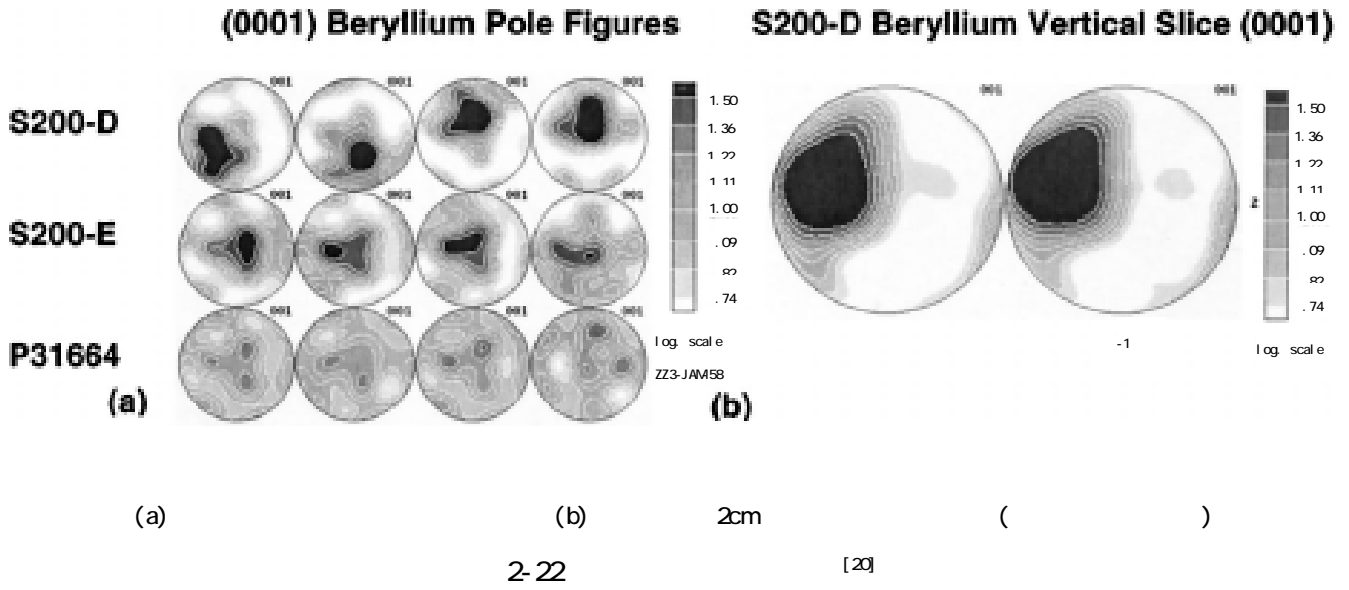
2-20

[19]

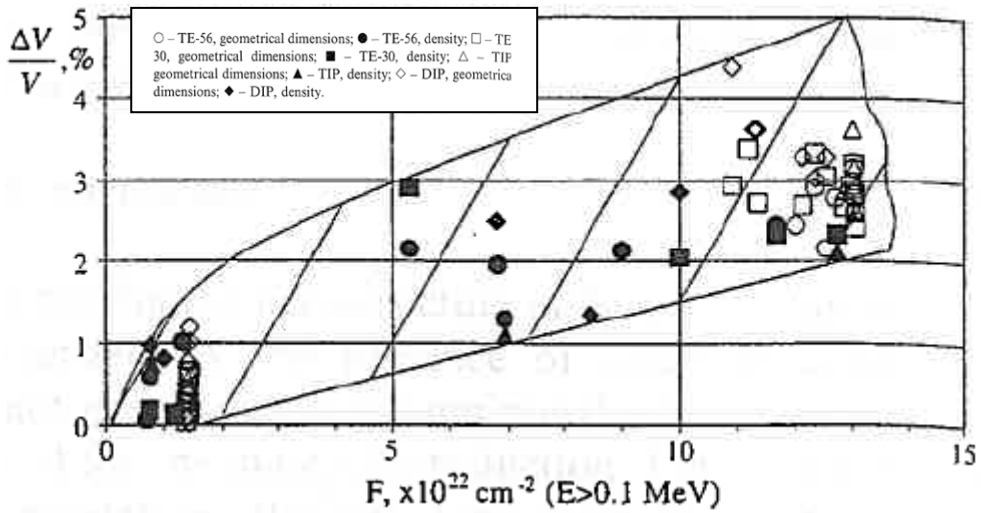
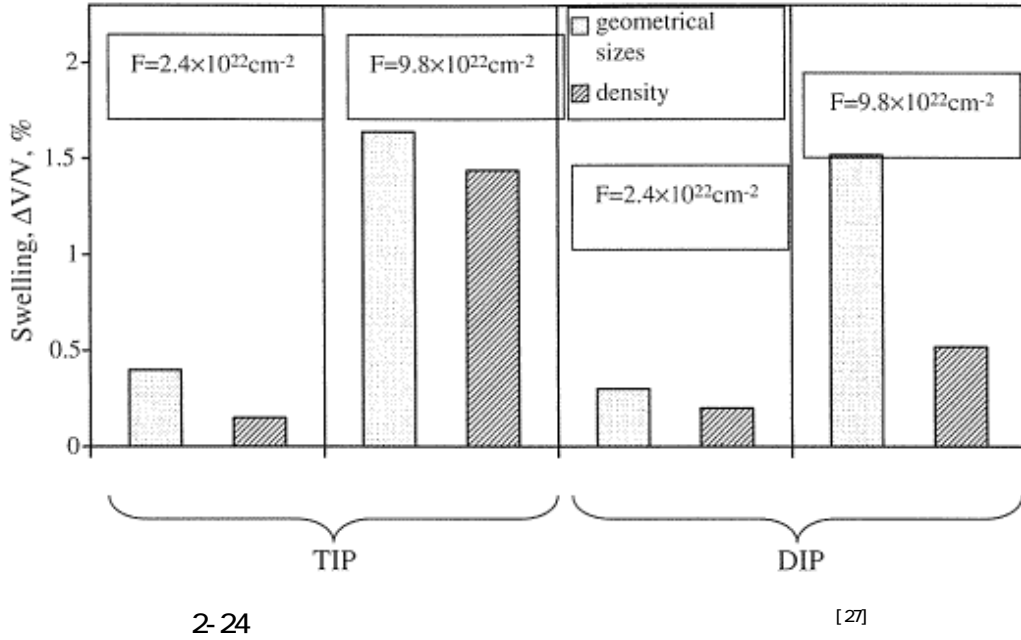


2-21

[19]



2-23



2-1

適用対象		超音波のパラメータ				
		伝搬時間	音速	減衰	周波数	音圧
厚さ計測		○				
材料の探傷		○			○	○
材料特性の計測	ヤング率		○		○	
	剛性率		○		○	
	引張り強さ			○		
	降伏強さ			○		
	硬さ		○			
	接着強さ				○	
材料劣化価	破壊遷移温度		○			○
	破壊靱性値		○			
	結晶粒度			○		
	内部摩擦性				○	
	水素侵入	○	○	○		
	クリープ損傷		○	○		
応力測定	疲労損傷		○	○		
	ボルト軸力管理	○				
流量計測		○			○	

文献) 大島栄次監修：設備診断予知保全実用事典，(1988)，243

2-2

(GPa) [18]

	Gold ^a	Tuer ^b	Smith, Arbogast ^c	Fisher, Dever ^d	Silversmith, Averbach ^e	Testardi, Condon ^f	Rowland, White ^g	Present
C_{11}	308	282	292.3	294.0	295.4	285.8	288.8	293.6
C_{33}	357	370	336.4	357.0	356.1	342.8	354.2	356.7
C_{44}	110	135	162.5	163.0	170.6	166.9	154.9	162.2
C_{66}	183	131	132.8	133.4	134.8	135.2	134.4	133.4
C_{12}	-58	20	26.7	27.6	25.9	14.8	201.	26.8
C_{13}	87	6.6	14.0	14.2	-1.0	11.0	4.7	14.0
E	293.9	294.4	311.1	315.8	317.6	311.1	306.9	315.2
B	128	111	114.4	117.1	110.4	109.4	109.8	116.8
G	132	139	148.6	150.3	155.6	151.6	148.4	150.1
ν	0.116	0.056	0.047	0.051	0.021	0.026	0.034	0.050

2-3

[18]

	B	E	G	C_1	ν
Poly.	116.6	313.8	149.2	315.5	0.0516
Mono.	116.8	315.2	150.1	316.9	0.0501

2-4

[18]

S_{11} (GPa ⁻¹)	0.003 440
S_{33}	0.002 813
S_{44}	0.006 165
S_{12}	-0.000 308
S_{13}	-0.000 123
E_{11} (GPa)	290.7
E_{33}	355.5
ν_{12}	0.0894
ν_{13}	0.0357
ν_{31}	0.0437

2-5

10¹¹dyn/cm² [19]

Temperature °C	C_{11}	C_{33}	C_{44}	C_{12}	C_{13}
Gold (1950)					
25	30-80	35-70	11-00	-5-80	8-70
Smith and Arbogast (1960)					
23	29-23	33-64	16-25	2-67	1-40
Silversmith and Averbach (1970)					
25	29-54	35-61	17-06	2-59	-0-10
25	28-88	35-42	15-49	2-01	0-47
50	28-59	35-15	15-40	1-96	0-37
75	28-31	34-86	15-31	1-90	0-26
100	28-02	34-57	15-22	1-85	0-16
125	27-73	34-29	15-13	1-80	0-06
150	27-45	34-02	15-05	1-74	-0-03
175	27-17	33-77	14-96	1-69	-0-13
200	26-89	33-53	14-87	1-65	-0-22
225	26-62	33-30	14-79	1-60	-0-31
250	26-35	33-07	14-71	1-55	-0-40
275	26-09	32-81	14-62	1-51	-0-49
300	25-83	32-51	14-54	1-46	-0-58

2-6 Be Be-Al

		x10 ⁻⁸ m									IACS %			x10 ⁸ m ⁻⁴				
Be	I.D.		1	2	3	4	5				1	2	3	1	2	3		
S-200F Charpy	S2F-5		321	345	338	345	326	335	011									
		2	268	283	290	292	248	276	018									
		3	380	367	354	364	-	366	011									
		4	397	392	399	391	-	395	004									
		5	381	378	377	383	-	380	003									
		6	418	424	432	394	424	418	015									
		7	445	446	451	451	441	447	004									
		8	454	445	427	438	483	449	021									
		9	518	512	521	541	529	524	011	4.87	39.37	40.03	40.39	4.38	4.31	4.27	4.32	
S-65C 10	S6C-D	0°	559	521	504	527	517	526	020									
		0°	496	549	555	548	-	537	028									
		90°	542	569	556	567	-	559	012	5.40	38.36	38.30	38.95	4.49	4.50	4.43	4.47	
S-200F 1.56t	S2F-1Y		474	467	493	469	497	480	014									
S-200F 1.386t	S2F-1		516	523	479	527	-	511	022	4.96	38.85	39.29	39.14	4.44	4.39	4.40	4.41	
S6-1 AlBe	ABE-1	0°	310	314	322	318	-	316	005									
		90°	308	309	326	325	-	317	010									
		0°	368	363	332	347	388	360	021	3.31	52.00	51.77	51.97	3.32	3.33	3.32	3.32	
Be-Al Disk	ABE-D									47.10	47.22	47.21	3.66	3.65	3.65	3.65		
SUS303	50 x5t		69.90	69.30	69.00	69.80	69.30	69.46	0.38									

1 4

2

3 5mm 10mm

4 IACS100% 1.7241x10⁸ m

4

2069

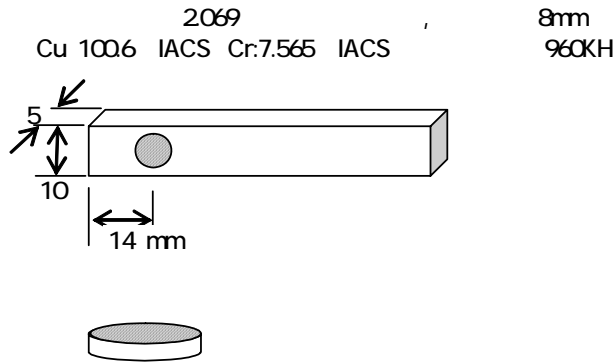
2-7 Be Be-Al

Be	I.D.	IACS %			x10 ⁸ m ⁻⁴						
		1	2	3	1	2	3				
Be-Al Disk	ABE-D	47.10	47.22	47.21	3.66	3.65	3.65	3.65	*1	-	
		47.82	47.69	47.79	3.61	3.62	3.61	3.61	*2	25.4	
		47.59	-	-	3.62	-	-	3.62	*2	25.4	
		47.83	47.63	-	3.60	3.62	-	3.61	*2	25.5	
		48.22	48.1	48.25	3.58	3.58	3.57	3.58	*2	28.6	
I-220H	I2H-D	39.49	40.02	39.54	4.37	4.31	4.36	4.34	*2	28.5	
	I2H-F	39.39	39.95	39.38	4.38	4.32	4.38	4.36	*2	28.5	H1
S-65H	S6H-D	43.78	43.43	44.36	3.94	3.97	3.89	3.93	*2	28.5	
	S6H-F	43.66	44.21	43.92	3.95	3.90	3.93	3.92	*2	28.5	S1
S-200F	S2F-D	39.36	39.78	39.80	4.38	4.33	4.33	4.35	*2	27.7	S-200F :4.41 *3
	S2F-F	39.33	40.21	39.34	4.38	4.29	4.38	4.35	*2	27.7	S1 S-200F :4.32

*1 2009/10/29 *2 2010/1/20 *3

4 IACS100% 1.7241x10⁸ m

2009/10/29



3.1

(EMAR)

3.1.1 EMAR

(Electromagnetic Acoustic Resonance EMAR)
 (Electromagnetic Acoustic Transducer EMAT)
 [29] 3-1
 EMAT
 RAM10000(RITEC)
 ()
 IF(Intermediate Frequency)
 () A/D
 EMAT
 0.5 20MHz
 EMAT
 (z) EMAT
) 3-2
 (H)

$$H = N i / (2r) \quad (3-1)$$

$$N \quad i \quad r \quad (B)$$

$$B = \mu_m H \quad (3-2)$$

$$\mu_m = \mu_r \mu_0 \quad \mu_r \quad (Al \quad Cu)$$

$$\mu_r \gg (\text{Fe} \quad N \quad Co)$$

(eddy current)

() (

$$\left(\frac{1}{\mu_m} \right) \left(\frac{Q}{37} \right)$$

$$1 / \left(f \mu_m \right)^{0.5} \quad (3-3)$$

$$\mu_m \quad f \quad \mu_m \quad \left(\quad \right)$$

$$\left(\quad \right)$$

$$\times \left(\quad \right)$$

$$\left(\quad \right)$$

$$\times \left(\quad \right)$$

()

$$EMT \quad y \quad F_y \quad y \quad (1) EMT$$

$$(2)$$

$$(3) \quad EMT \quad (4) \quad EMT$$

$$EMT \quad [30][31] \quad EMT$$

$$\left(\quad \right) \quad d \quad EMT \quad 1 \quad (1)$$

$$T$$

$$EMT$$

$$3-3(a)$$

$$\left(\quad \right) \quad \left(\quad 2d \quad \right) \quad T_o$$

(3-3(b))

T_0

$$T_n T \quad (3-4)$$

(n T) (3-3(c))

$$\begin{matrix} T & n \\ f_n & n \\ d & C \end{matrix}$$

$$f_n n C (2d) \quad (3-5)$$

EMAT

EMAT

EMAT

EMAR EMAT

3 1. 2

EMAT 8mm

EMAT 3-4 [31]

(fr)

(ft) 1

(5)

fn (5) C

$$100 \times \frac{(f_t - f_r)}{\{(f_t + f_r)/2\}} \quad 3-6$$

$$f_l / f_r \quad (3-7)$$

f_l

3.1.3

3-1 ± 4mm 6
 NFD Nb. G 01, 2009/10) 15 3-2 3-1
 3-2 ID
 ID

3.1.4

X
 X
 EBSD (Electron Back Scatter Diffraction Patterns) Be
 XRD -
 X (Rigaku RINT-2000) (10×
 1.4mm S-65C ID S6C-D 10mm
 -2 (1.0 0.6 ° /
 0.02°) X (Cu K-1 40 Vx40mA) 2 20-140°
 JCPDS Be BeO 3-5
 JCPDS Be(
) (101) (002)
 (004) (103) (100)
 (Be

XRD
 hcp Be C ()
 X
 (3-6 3-7) (002) (101)
 C ()
)

Be C X
 3-3

3.1.5

(1)

() (C_{ij}, i_j) ()
 (C_{ij}, i_j)
 () ()
 3-8
 ()
 (two-fold symmetry)

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{S}_{11} & \hat{S}_{12} & \hat{S}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & \hat{S}_{22} & \hat{S}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & \hat{S}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \hat{S}_{44} & 0 & 0 \\ & & & & \hat{S}_{55} & 0 \\ & & & & & \hat{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

ε_i σ_i (i=1, 2, 3, 6) 3-8
 n t l tl ln
 \hat{S}_{ij}

(2)

Be (X'₁, X'₂, X'₃) S_{ij} (X'₁, X'₂, X'₃)
 Be 3-9 (X'₂X'₃) (0X'₂) (0X'₁)
 3-9

$$S'_{ijkl} = a_{mk} \cdot a_{jn} \cdot a_{ko} \cdot a_{lp} \cdot S_{mnop}$$

$(0X_3)$ $(0X')$

$$a_{ik} \cdot a_{jk} = \delta_{ij} \quad (i, j, k=1, 2, 3) \quad (3-9)$$

3-9

$$\left. \begin{aligned} a_{13} &= \cos \phi \\ a_{23} &= \sin \phi \cdot \cos \alpha \\ a_{33} &= \sin \phi \cdot \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3-10)$$

$$(0X_2) \quad (X'_2 0X'_3) \quad a_{12} = 0 \quad (10) \quad (9)$$

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \sin \phi & 0 & \cos \phi \\ -\cos \phi \cdot \cos \alpha & \sin \alpha & \sin \phi \cdot \cos \alpha \\ -\cos \phi \cdot \sin \alpha & -\cos \alpha & \sin \phi \cdot \sin \alpha \end{bmatrix}$$

$$S'_{1111} \quad S'_{11}$$

$$\begin{aligned} S'_{11} = & S_{11} \cdot a_{11}^4 + S_{12} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{13} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{21} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{12}^2 + S_{22} \cdot a_{12}^4 \\ & + S_{23} \cdot a_{12}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{31} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{32} \cdot a_{12}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{33} \cdot a_{13}^4 + S_{44} \cdot a_{12}^2 \cdot a_{13}^2 \\ & + S_{55} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{13}^2 + S_{65} \cdot a_{11}^2 \cdot a_{12}^2 \end{aligned}$$

Be

(,)

Be

S'_{ij}

$$\left. \begin{aligned}
 S'_{11} &= S_{11} \cdot \sin^4 \phi + S_{33} \cdot \cos^4 \phi + (2 \cdot S_{13} + S_{44}) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \phi \\
 S'_{22} &= A \cdot \sin^4 \phi \cdot \cos^4 \alpha + (2 \cdot S_{13} + S_{44} - 2 \cdot S_{11}) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha + S_{11} \\
 S'_{33} &= A \cdot \sin^4 \phi \cdot \sin^4 \alpha + (2 \cdot S_{13} + S_{44} - 2 \cdot S_{11}) \cdot \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha + S_{11} \\
 S'_{12} &= A \cdot \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha + B \cdot (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha) + S_{12} \\
 S'_{13} &= A \cdot \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha + B \cdot (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha) + S_{12} \\
 S'_{23} &= A \cdot \sin^4 \phi \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha + B \cdot \sin^2 \phi + S_{12} \\
 S'_{44} &= 4 \cdot A \cdot \sin^4 \phi \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha + 2 \cdot (S_{11} - S_{12}) \cdot \cos^2 \phi + S_{44} \cdot \sin^2 \phi \\
 S'_{55} &= 4 \cdot A \cdot \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha + (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{44}) \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha + S_{44} \\
 S'_{66} &= 4 \cdot A \cdot \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \phi \cdot \cos^2 \alpha + (2 \cdot S_{11} - 2 \cdot S_{12} - S_{44}) \cdot \sin^2 \phi \cdot \sin^2 \alpha + S_{44} \\
 A &= S_{11} - 2 \cdot S_{13} + S_{33} - S_{44} \\
 B &= S_{13} - S_{12}
 \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

(3)

11

\hat{S}_{ij}

9

[33]

(0002)

Be

$$\begin{aligned}
 \hat{S}_{ij} &= \frac{\int S'_{ij}(\phi, \alpha) \cdot dV}{\int dV} \\
 &= \frac{\int_0^\pi \left(\int_0^{2\pi} S'_{ij}(\phi, \alpha) \cdot I(\phi, \alpha) \cdot \sin \phi \cdot d\alpha \right) \cdot d\phi}{\int_0^\pi \left(\int_0^{2\pi} I(\phi, \alpha) \cdot \sin \phi \cdot d\alpha \right) \cdot d\phi} \quad (3-12)
 \end{aligned}$$

$$S'_{ij} \quad (11) \quad (,) \quad 3-9$$

(0002)

I

Random

$$\text{Texture} \quad I(,) \quad 1 \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_{11} &= \frac{1}{15} \cdot (8 \cdot S_{11} + 3 \cdot S_{33} + 2 \cdot S_{44} + 4 \cdot S_{13}) \\ \hat{S}_{66} &= S_{44} + \frac{4}{15} \cdot (S_{11} - 2 \cdot S_{13} + S_{33} - S_{44}) + \frac{2}{3} \cdot \left(S_{11} - S_{12} - \frac{1}{2} \cdot S_{44} \right) \\ \hat{S}_{12} &= \frac{1}{15} \cdot (S_{11} - 2 \cdot S_{13} + S_{33} - S_{44}) + S_{12} + \frac{2}{3} \cdot (S_{13} - S_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (3-13)$$

$$\hat{S}_{66} = 2 \cdot (\hat{S}_{11} - \hat{S}_{12})$$

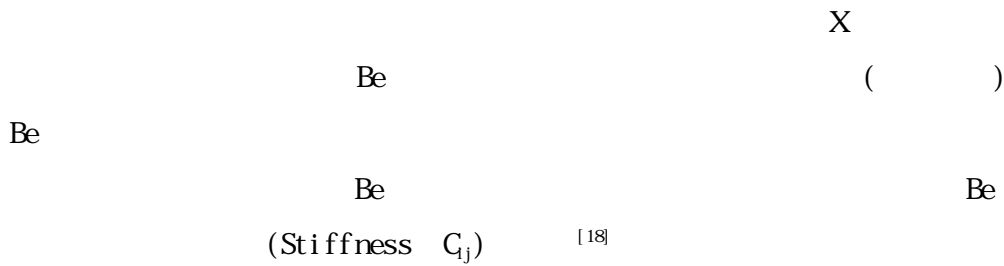
Be C

(11) \hat{S}_{ij}

$\cos \phi = 1, \sin \phi = 0$

$$\hat{S}_{ij} = \begin{bmatrix} S_{33} & S_{13} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2(S_{11} - S_{12}) & 0 & 0 \\ & & & & S_{44} & 0 \\ & & & & & S_{44} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

4



$$\begin{bmatrix} 293.6 & 26.8 & 14 & 0 & 0 & 0 \\ 26.8 & 293.6 & 14 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 14 & 356.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 162.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 162.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 133.4 \end{bmatrix}$$

Unit: GPa

Be Compliance(S_{ij}) (15)

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 344.00 & -30.81 & -12.29 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -30.81 & 344.00 & -12.29 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -12.29 & -12.29 & 281.31 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 616.52 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 616.52 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 749.63 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

$10^{14} \text{m}^2/\text{N}$

$$\hat{S}_{ij} \quad 11 \quad (12) \quad (15)$$

(13) (15)

$$\begin{bmatrix} 318.65 & -16.24 & -16.24 & 0 & 0 & 0 \\ -16.24 & 318.65 & -16.24 & 0 & 0 & 0 \\ -16.24 & -16.24 & 318.65 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 669.79 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 669.79 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 669.79 \end{bmatrix}$$

$10^{14} \text{m}^2/\text{N}$

(14) (15)

$$\begin{bmatrix} 281.31 & -12.29 & -12.29 & 0 & 0 & 0 \\ -12.29 & 344.00 & -30.81 & 0 & 0 & 0 \\ -12.29 & -30.81 & 344.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 749.63 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 616.52 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 616.52 \end{bmatrix}$$

$10^{14} \text{m}^2/\text{N}$

$$C_{ij} \quad C_{ij} = (S_{ij})^{-1}$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 315.5 & 16.9 & 16.9 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 16.9 & 315.5 & 16.9 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 16.9 & 16.9 & 315.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 149.3 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 149.3 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 149.3 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

Unit: GPa

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 356.7 & 14.0 & 14.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 14.0 & 293.6 & 26.8 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 14.0 & 26.8 & 293.6 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 133.4 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 162.2 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 162.2 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

Unit: GPa

$$E = (1/\hat{S}_{11}) = (1/318.65) \times 10^{14} \text{ N/m}^2 = 313.8 \text{ GPa}, \quad \nu = -(\hat{S}_{21}/\hat{S}_{11}) = 16.24/318.65 = 0.051,$$

$$B = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{313.8}{3(1-2 \times 0.051)} = 116.5 \text{ GPa}, \quad G = (1/\hat{S}_{44}) = 1/669.79 = 149.3 \text{ GPa}$$

3.1.6

$$\left(\begin{array}{c} \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} \right) \text{ Be}$$

[34]

$$C_{ijkl} U_{k,lj} \quad \ddot{U} = 0 \tag{3-18}$$

$$C_{ijkl} \quad U$$

$$U_i = A P_i \exp i w(k_j x_j - t) = A P_i \exp i \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} [n_j x_j - \nu(n_j) t] \right\} \tag{3-19}$$

A

P_i

k_j

n_j

(n_j) n_j

w

19 18

$$C_{ijkl} n_j n_l \quad \sum_{ik} P_k = 0 \tag{3-20}$$

Christoffel Kelvin

$$\det \quad ik \quad ^2 \quad ik = 0 \quad (3-21)$$

ik

n_1^2	n_2^2	n_3^2	$2n_2n_3$	$2n_3n_1$	$2n_1n_2$		
11		C_{11}	C_{66}	C_{55}	C_{56}	C_{15}	C_{16}
22		C_{66}	C_{22}	C_{44}	C_{24}	C_{46}	C_{26}
33		C_{55}	C_{44}	C_{33}	C_{34}	C_{35}	C_{45}
23		C_{56}	C_{24}	C_{34}	$(C_{23}+C_{44})/2$	$(C_{36}+C_{45})/2$	$(C_{25}+C_{46})/2$
13		C_{15}	C_{46}	C_{35}	$(C_{36}+C_{45})/2$	$(C_{13}+C_{55})/2$	$(C_{14}+C_{56})/2$
12		C_{15}	C_{26}	C_{45}	$(C_{25}+C_{46})/2$	$(C_{14}+C_{56})/2$	$(C_{12}+C_{66})/2$

3

9

[35]

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

(3-22)

Kelvin-Christoffel

$$11 = n_1^2 C_{11} + n_2^2 C_{66} + n_3^2 C_{55}$$

$$22 = n_1^2 C_{66} + n_2^2 C_{22} + n_3^2 C_{44}$$

$$33 = n_1^2 C_{55} + n_2^2 C_{44} + n_3^2 C_{33}$$

$$23 = (C_{23}+C_{44}) n_2 n_3$$

$$13 = (C_{13}+C_{55}) n_3 n_1$$

$$12 = (C_{12}+C_{66}) n_1 n_2$$

(3-23)

21 23

$$\begin{aligned}
 (1) &= (C_{11}/\rho)^{1/2} \\
 (2) &= (C_{66}/\rho)^{1/2} \\
 (3) &= (C_{55}/\rho)^{1/2}
 \end{aligned}
 \tag{3-24}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Be} \quad () \\
 & \quad [18] \quad 1.842\text{g/cm}^3 [18] \\
 (24) \quad (16) \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1) &= (C_{11}/\rho)^{1/2} = 13087 \text{ m/s} \\
 (2) &= (3) = (C_{66}/\rho)^{1/2} = 9003 \text{ m/s} \\
 & \quad / = 1.454 (=13087/9003)
 \end{aligned}$$

C

$$\begin{aligned}
 (1) &= (C_{11}/\rho)^{1/2} = 13916 \text{ m/s} () \\
 (2) &= (3) = (C_{66}/\rho)^{1/2} = 9384 \text{ m/s} () \\
 & \quad (/) = 1.438 (=13916/9384)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (a) \quad \text{Be} \quad \text{Be} \\
 & () \quad (b) \\
 1.06 \quad (=13916/13087) \quad 1.04 \quad (=9384/9003)
 \end{aligned}$$

3.2

3-1 (RI TEC , RAM10000) EMAT(NFD
8mm)

Be
()
3 15MHz

3-1

3-10

3-15

(5)

()

(1)

()

Be

(2) EMAR

(1.0 1.5mm)

5mm

3 3

(EMAR)

3 2

3-2

(2-7

)

3-16

3-19

3 2

3-15

3-19

(ABE-D)

3 2

3 4

3 4

3 4 1

(960 Hz)

1.5mm

5mm

2-8

I2HD

I2H5I

S6HD

S6H5I

1mm

5mm

(<0.5)

(ABE-D)

1

(1.5mm)

(5mm)

3-5

(S-200F, S-65HI I-220H)

5mm

()

S2F-5I/S6H5I/I2H5I

9.07(0.07)/9.10(0.07)/9.10(0.09) km/s Be
 Be 3.1

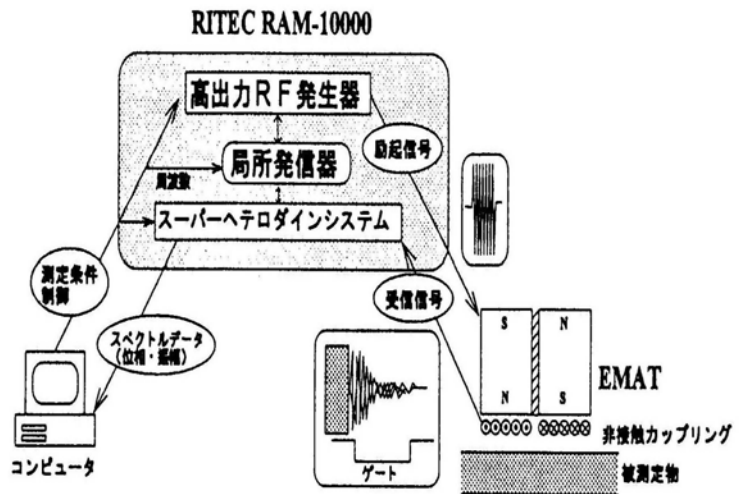
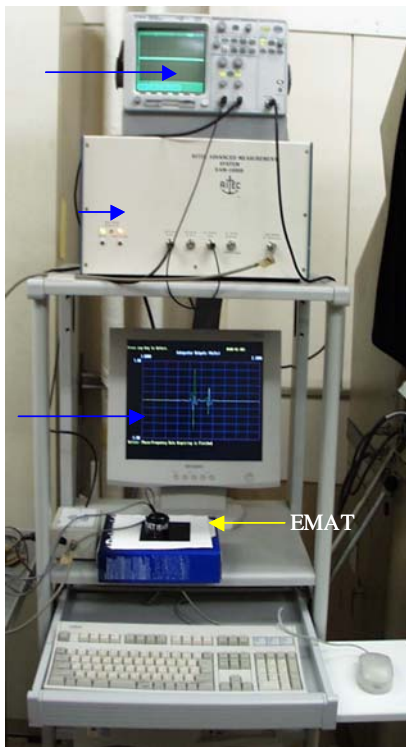
9.003km/s C 9.384km/s EMAR

3.4.2 ()

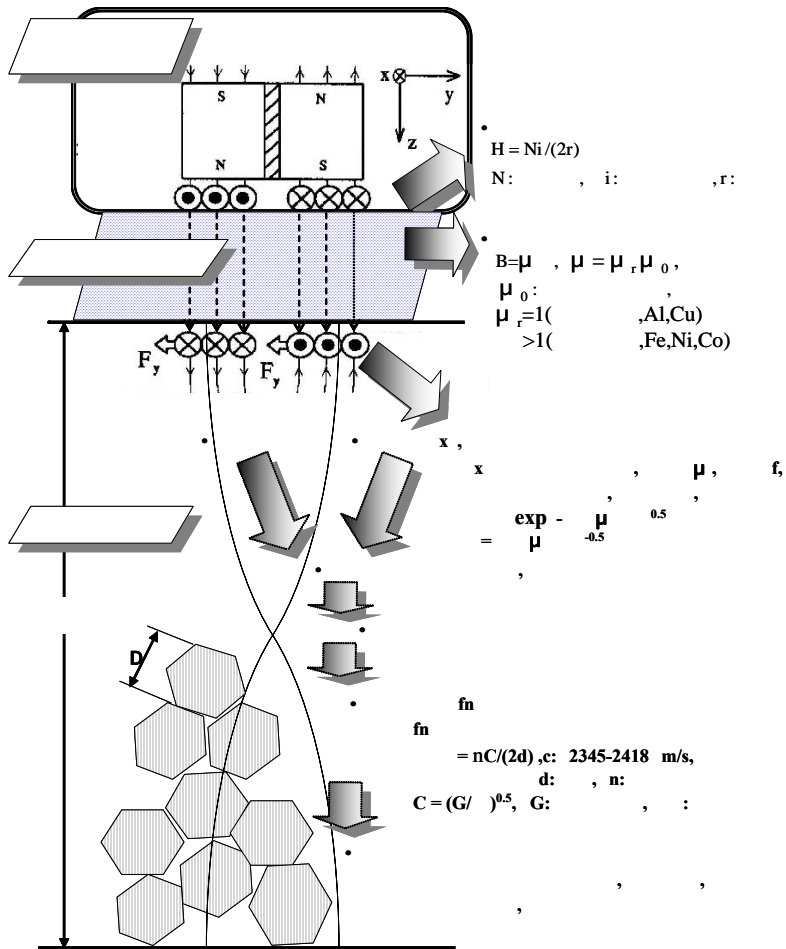
(1.0

1.5mm) (S2F-5 5mm) 3-6
 (960 Hz) Al 40wt% Be-Al (ABE-1, ABE-D)
 3.5μ cm Be (4.4μ cm) 80
 (3.9μ cm) (S6HD) BeO Be (1.0
 1.1) (0.7%) Be (S6C-D)
 BeO 0.7 Be BeO
 (S6HD) Be (S6C-D) HP VP

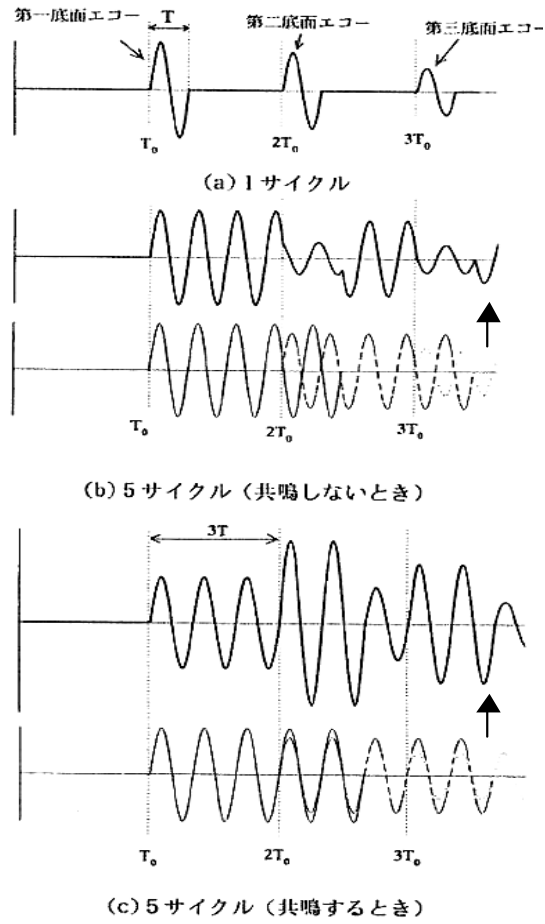
(1.5mm) 3-6
 Be 9.2 9.7km/s Be-Al 6.5
 6.6km/s 70 (/)
 3-5 ABE-D S2F-D/S6HD/I2HD/ABE-D
 1.387/1.389/1.380/1.575 Be
 (1.38 1.39) Be-Al Be 1.58



3-1

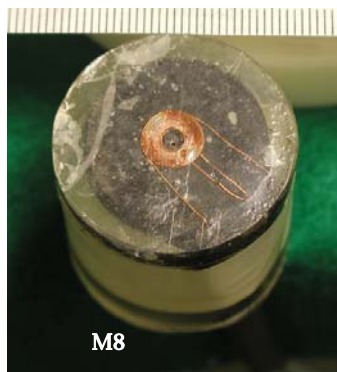


3-2 EMAT



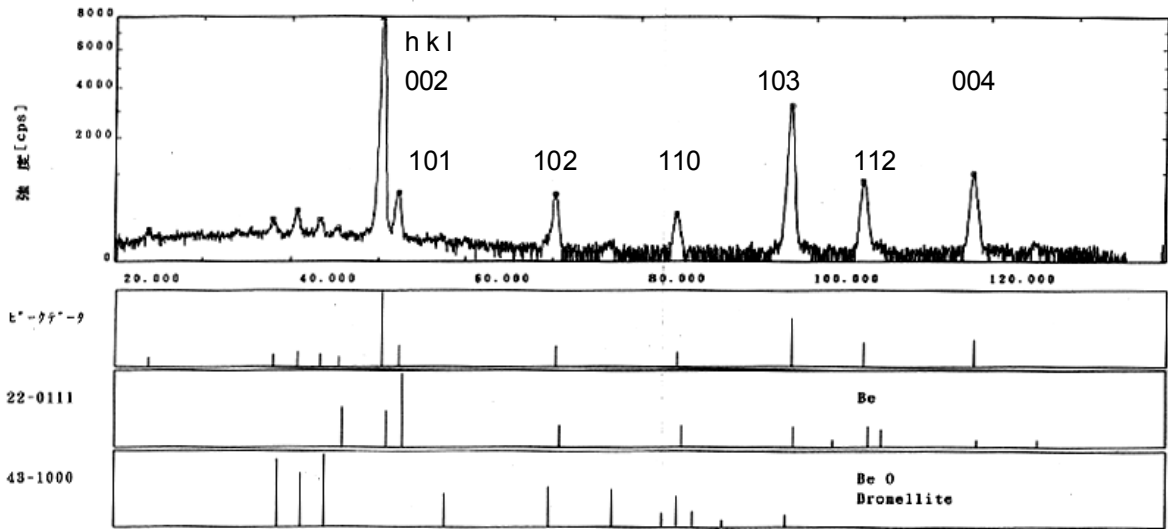
3-3

[29]



3-4

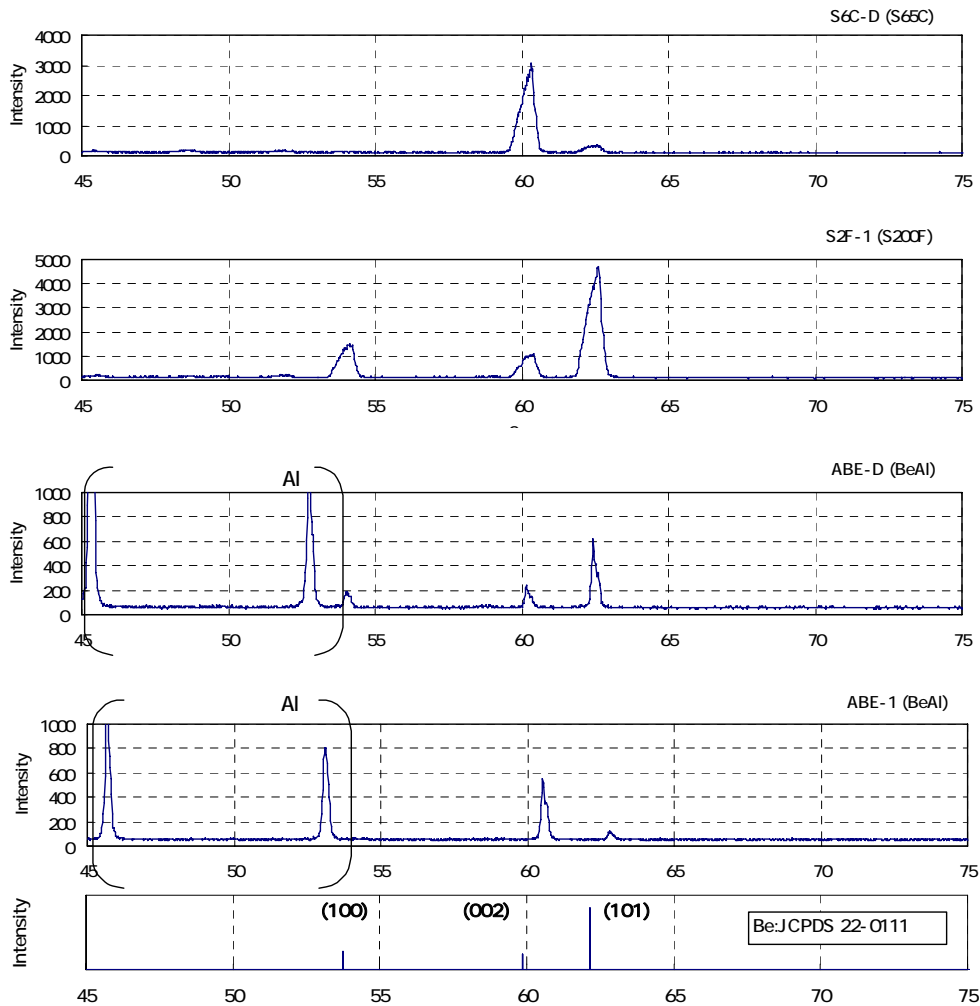
EMAT



Rigaku RINT-2000: Cu k-₁ 40 Vx40mA, Scan speed 4° /min.

3-5 X

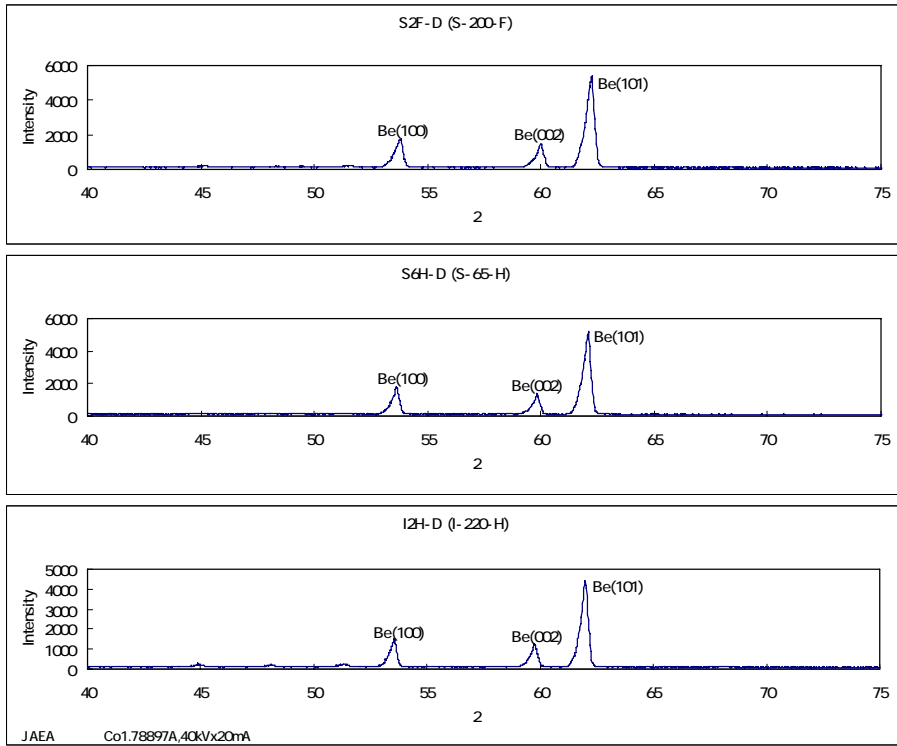
ID S6C-D



JAEA : Co, 1.78897A, Vx20mA

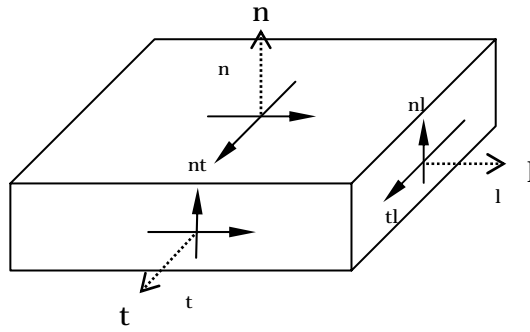
3-6 X

ID S6C-D, S2F-1, ABE-D, ABE-1

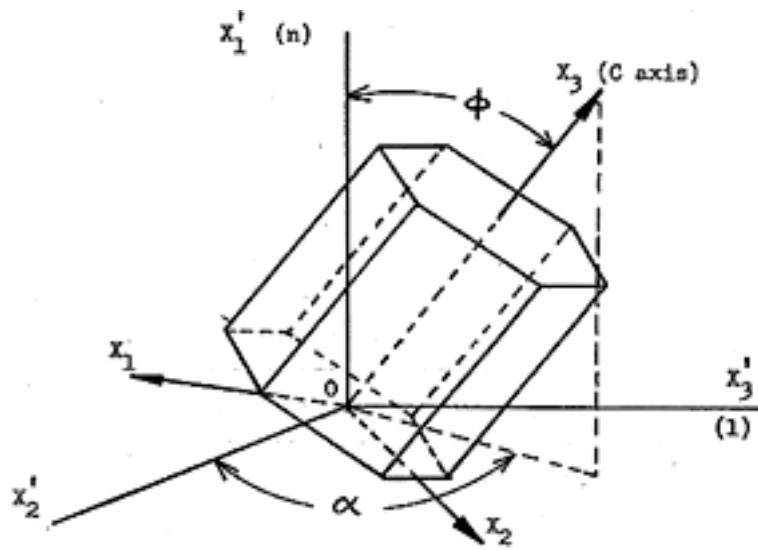


3-7 X

ID S6F-D, S6H-D, I2H-D



3-8



Relationships between crystallographic axes: OX_1, OX_2, OX_3 , and the macroscopic reference axes: OX'_1, OX'_2, OX'_3 ,

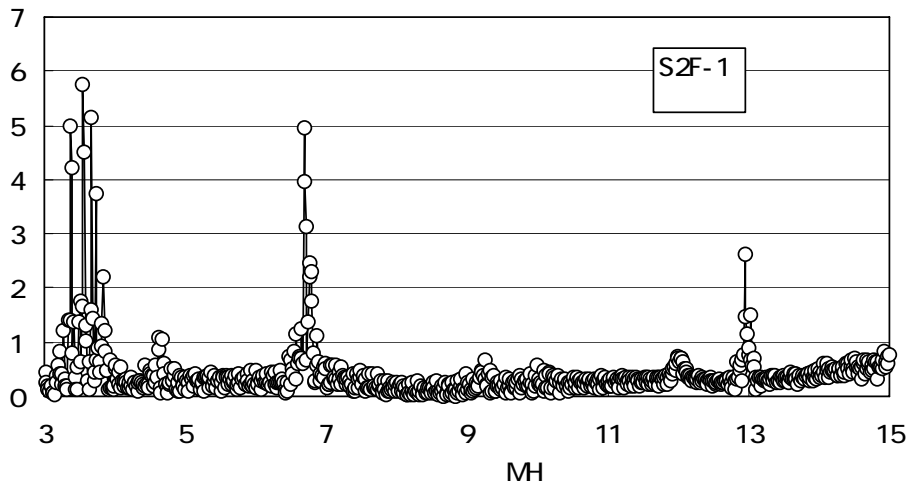
3-9



S2F-1

	MH	MH	MH	MH	MH
	1.388	4.648	6.775	9.232	10.131
1	12.9028	18.8074	25.62803	28.12366	35.44397
2	6.451424	9.4037	12.814	14.06183	17.72198
3	4.300949	6.269133	8.542677	9.374552	11.81466
4	3.225712	4.70185	6.407008	7.030914	8.860992
5	2.58057	3.76148	5.125606	5.624731	7.088794

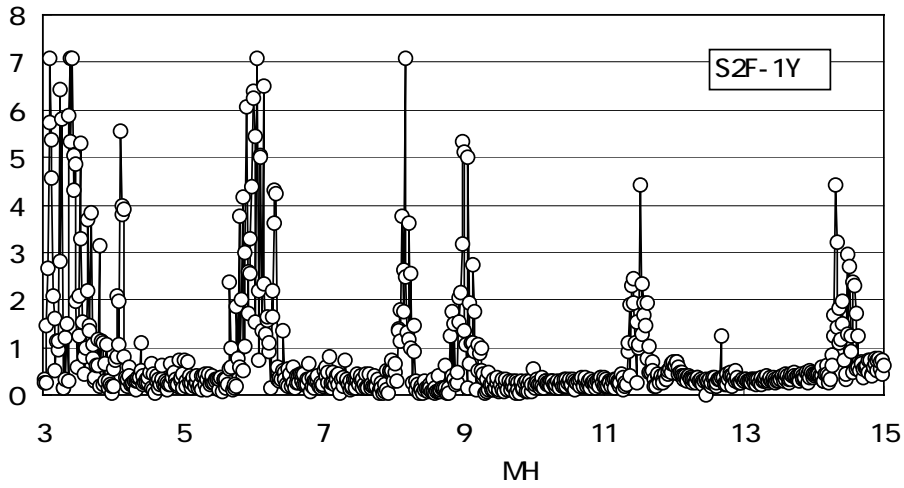
= 9.21 Km/s = 1286 Km/s
 = 0.31 Km/s = --- Km/s



S2F-1

	MH	MH	MH
	1.388	3.554	6.685
1	9.865904	18.55756	35.94365
2	4.932952	9.27878	17.97182
3	3.288635	6.185853	11.98122
4	2.466476	4.63939	8.985912
5	1.973181	3.711512	7.18873
6	1.644317	3.092927	5.990608

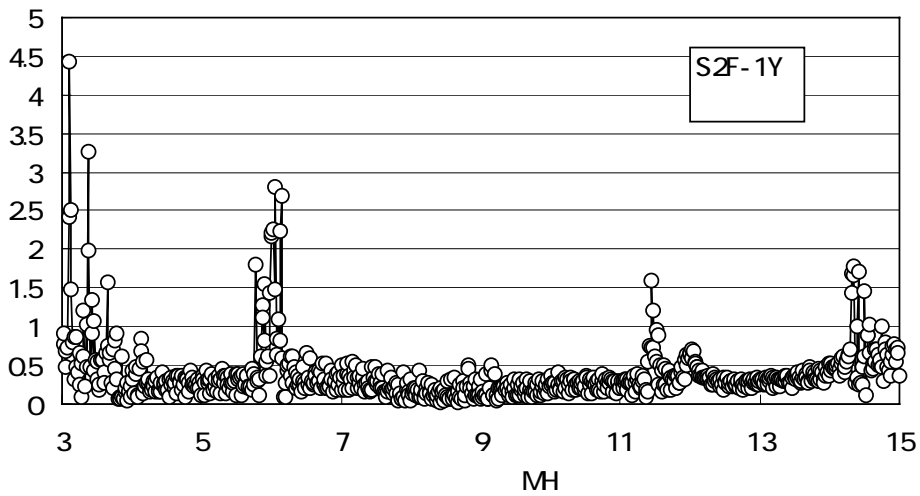
= 9.132346 Km/s
 = -- Km/s



S2F-1Y

	MH	MH	MH	MH	MH
	1.561	6.056	8.169	8.993	11.524
1	18.90683	25.50362	28.07615	35.97793	44.67894
2	9.453416	12.7518	14.03807	17.98896	22.33947
3	6.302277	8.501206	9.358715	11.99264	14.89298
4	4.726708	6.375905	7.019037	8.994482	11.16974
5	3.781366	5.100724	5.615229	7.195586	8.935788
6	3.151139	4.250603	4.679358	5.996321	7.44649
7	2.700976	3.643374	4.010878	5.139704	6.382706

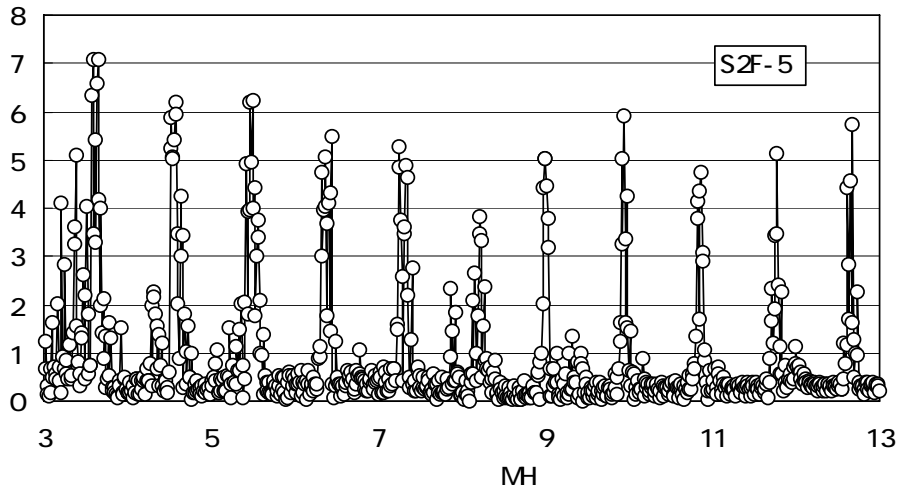
= 9.19 Km/s = 1275 Km/s
 : 0.26 Km/s : -- Km/s



S2F-1Y

	MH	MH	MH	MH
	1.561	3.375	6.056	11.449
1	10.53675	18.90683	35.74378	45.00675
2	5.268375	9.453416	17.87189	22.50338
3	3.51225	6.302277	11.91459	15.00225
4	2.634188	4.726708	8.935945	11.25169
5	2.10735	3.781366	7.148756	9.00135
6	1.756125	3.151139	5.957296	7.501125
7	1.50525	2.700976	5.106254	6.429536

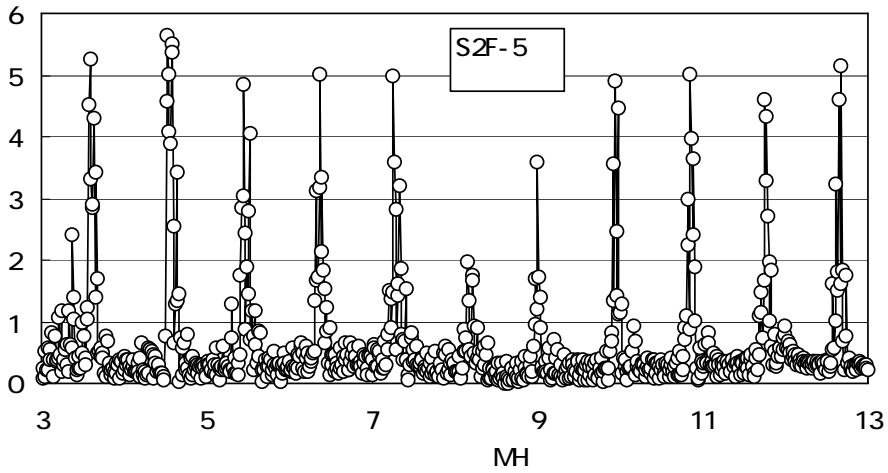
= 9.13 Km/s
 : 0.28 Km/s



S2F-5

	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH
5.006	3649	4573	5497	6446	7257	8218	9005	9941	10865	11777	12675
1	3653379	4578488	5508596	6453735	7265708	8227862	9015806	9952929	1087804	1179113	1269021
2	1826689	2289244	2751798	3226868	3632854	4113931	4507903	4976465	5439019	5895566	6345105
3	1217793	1526163	1834532	2151245	2421903	2742621	3005269	3317643	3626013	3930377	423007
4	9133447	11.44622	13.75899	16.13434	18.16427	20.56965	22.53952	24.88232	27.1951	29.47783	31.72553
5	7.306758	9.156975	11.00719	12.90747	14.53142	16.45572	18.03161	19.90586	21.75608	23.58226	25.38042
6	6.088965	7.630813	9.172661	10.75623	12.10951	13.7131	15.02634	16.58822	18.13006	19.65189	21.15035
7	5.219113	6.540697	7.862281	9.219622	10.37958	11.75409	12.87972	14.21847	15.54005	16.84447	18.12887
8	4.566724	5.72311	6.879496	8.067169	9.082136	10.28483	11.26976	12.44116	13.59755	14.73892	15.86276
9	4.05931	5.087208	6.115107	7.170817	8.073009	9.142068	10.01756	11.05881	12.08671	13.10126	14.10023
10	3.653379	4.578488	5.508596	6.453735	7.265708	8.227862	9.015806	9.952929	10.87804	11.79113	12.69021
11	3.321253	4.162261	5.003269	5.867032	6.605189	7.479874	8.196187	9.048117	9.889125	10.71921	11.53655
12	3.044482	3.815406	4.58633	5.378113	6.054757	6.856551	7.513172	8.294108	9.065032	9.825944	10.57518
13	2.810291	3.521914	4.233536	4.964412	5.589006	6.329124	6.935235	7.656099	8.367722	9.070102	9.7617
14	2.609556	3.270348	3.93114	4.609811	5.189792	5.877044	6.439861	7.109235	7.770027	8.422237	9.064436

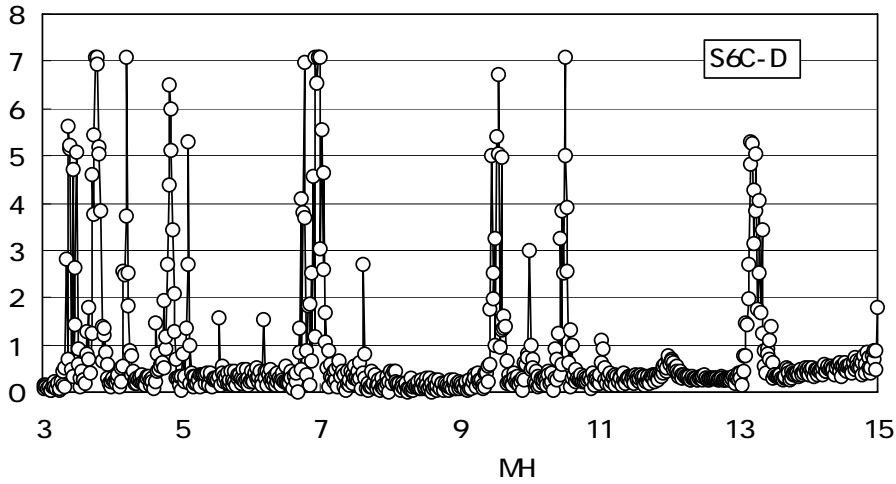
911 Km/s
= 006 Km/s



S2F-5

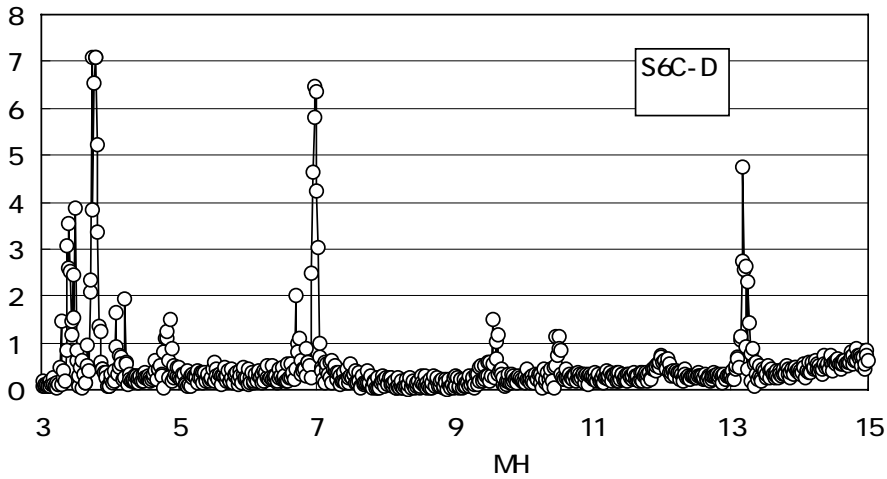
	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH	MH
5.006	3587	4523	5447	6371	7257	8156	9005	9941	10853	11752	12675
1	3591304	4528428	5453536	6378645	7265708	8165787	9015806	9952929	1086602	117661	1269021
2	17.95652	22.64214	27.26768	31.89323	36.32854	40.82894	45.07903	49.76465	54.33012	58.83051	63.45105
3	11.97101	15.09476	18.17845	21.26215	24.21903	27.21929	30.05269	33.17643	36.22038	39.22034	42.3007
4	8978261	11.32107	13.63384	15.94661	18.16427	20.41447	22.53952	24.88232	27.16506	29.41526	31.72553
5	7.182609	9.056855	10.90707	12.75729	14.53142	16.33157	18.03161	19.90586	21.73205	23.5322	25.38042
6	5.985507	7.547379	9.089227	10.63108	12.10951	13.60965	15.02634	16.58822	18.11004	19.61017	21.15035
7	5.130435	6.469182	7.790766	9.11235	10.37958	11.66541	12.87972	14.21847	15.52289	16.80872	18.12887
8	4.489131	5.660535	6.816921	7.973307	9.082136	10.20723	11.26976	12.44116	13.58253	14.70763	15.86276
9	3.990338	5.081586	6.059485	7.087384	8.073009	9.073097	10.01756	11.05881	12.07336	13.07345	14.10023
10	3.591304	4.528428	5.453536	6.378645	7.265708	8.165787	9.015806	9.952929	10.86602	11.7661	12.69021
11	3.264822	4.116752	4.95776	5.798768	6.605189	7.423443	8.196187	9.048117	9.878203	10.69646	11.53655
12	2.992754	3.77369	4.544614	5.315538	6.054757	6.804823	7.513172	8.294108	9.05802	9.805085	10.57518
13	2.762542	3.483406	4.195028	4.90665	5.589006	6.281375	6.935235	7.656099	8.35848	9.060848	9.7617
14	2.565217	3.234591	3.895383	4.556175	5.189792	5.832705	6.439861	7.109235	7.761445	8.404359	9.064436

= 906 Km/s
= 004 Km/s



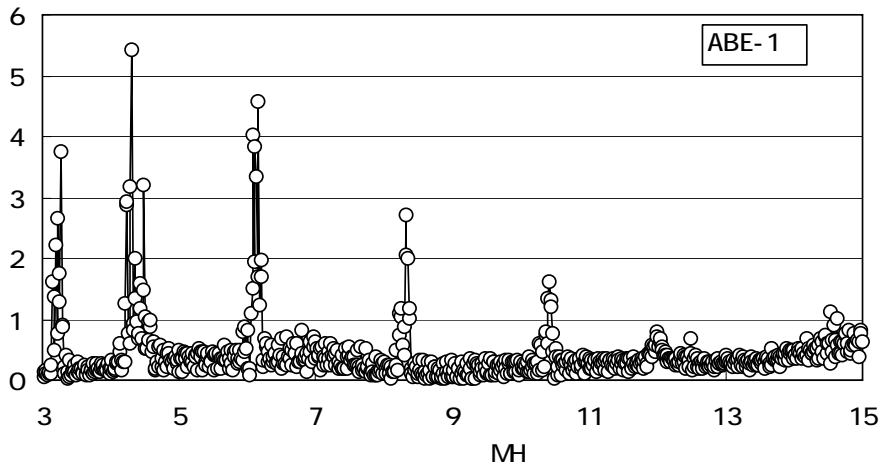
S6C-D	MH	MH	MH	MH	MH	MH
	1.391	4.213	4.828	6.985	9.562	10.506
1	11.72057	13.4315	19.43227	26.60148	29.22769	36.72796
2	5.860283	6.715748	9.716135	13.3007	14.61385	18.36398
3	3.906855	4.477165	6.477423	8.867161	9.742564	12.2427
4	2.930142	3.357874	4.858068	6.650371	7.306923	9.181991
5	2.344113	2.686299	3.886454	5.320297	5.845538	7.345593
6	1.953428	2.238583	3.238712	4.433581	4.871282	6.121327
7	1.674367	1.918785	2.776039	3.800212	4.175385	5.246852
8	1.465071	1.678937	2.429034	3.325186	3.653462	4.590996
9	1.302285	1.492388	2.159141	2.95572	3.247521	4.080885
10	1.172057	1.34315	1.943227	2.660148	2.922769	3.672796
11	1.065506	1.221045	1.76657	2.418317	2.657063	3.338906
12	0.976714	1.119291	1.619356	2.21679	2.435641	3.060664
13	0.901582	1.033192	1.49479	2.046268	2.248284	2.825228

= 973 Km/s = 1299 Km/s
 : 002 Km/s : 065 Km/s



S6C-D	MH	MH	MH	MH	MH	MH
	1.391	3.794	4.873	6.985	9.547	10.506
1	10.55491	13.5567	19.43227	26.55975	29.22769	36.68623
2	5.277454	6.778343	9.716135	13.2799	14.61385	18.34312
3	3.518303	4.518895	6.477423	8.853251	9.742564	12.2287
4	2.638727	3.389172	4.858068	6.639939	7.306923	9.171559
5	2.110982	2.711337	3.886454	5.311951	5.845538	7.337247
6	1.759151	2.259448	3.238712	4.426626	4.871282	6.114372

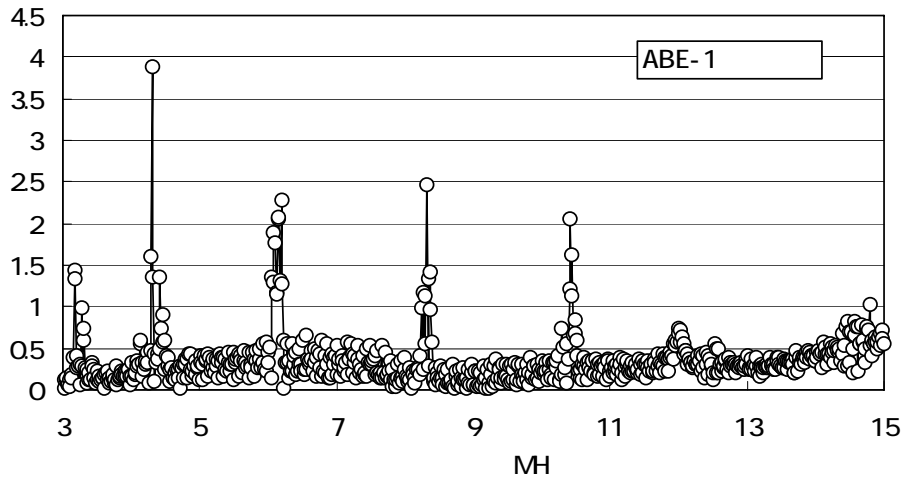
= 973 Km/s = 1302 Km/s
 : 002 Km/s : 070 Km/s



ABE-1

	MH	MH	MH	MH	MH	MH
	1.569	4.303	6.161	8.318	10.416	12.483
1	13.50281	19.33322	26.10188	32.68541	39.17165	45.61397
2	6.751407	9.666609	13.05094	16.3427	19.58583	22.80698
3	4.500938	6.444406	8.700628	10.89514	13.05722	15.20466
4	3.375704	4.833305	6.525471	8.171352	9.792914	11.40849
5	2.700563	3.866644	5.220377	6.537082	7.834331	9.122794
6	2.250469	3.222203	4.350314	5.447568	6.528609	7.602328
7	1.928973	2.761888	3.728841	4.669344	5.595951	6.516281
8	1.687852	2.416652	3.262736	4.085676	4.896457	5.701746
9	1.500313	2.148135	2.900209	3.631712	4.352406	5.068219
10	1.350281	1.933322	2.610188	3.268541	3.917165	4.561397
11	1.227529	1.757565	2.372899	2.971401	3.561059	4.146724
12	1.125235	1.611102	2.175157	2.723784	3.264305	3.801164
13	1.038678	1.487171	2.007837	2.514262	3.013204	3.508767

= 651 Km/s
 = 004 Km/s



ABE-1

	MH	MH	MH	MH
	1.569	4.303	6.191	8.318
1	13.50281	19.42736	26.10188	32.68541
2	6.751407	9.713679	13.05094	16.3427
3	4.500938	6.475786	8.700628	10.89514
4	3.375704	4.85684	6.525471	8.171352
5	2.700563	3.885472	5.220377	6.537082
6	2.250469	3.237893	4.350314	5.447568
7	1.928973	2.775337	3.728841	4.669344

657 Km/s
 = 012 Km/s

3-1

ID			(wt%) ^{*1}					
			Be	BeO	Al	Fe		
S2F-1		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.10	VP ^{*2}	
S2F-1Y		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.10	VP	
S2F-5		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.10	VP	
S6C-D		S-65C	99.4	0.7	0.02	0.06	VP	Be
ABE-1	Be-Al	Al BeMet	60-64	-	Bal.	-	HP ^{*2}	
S2F-D		S-200F	99.0	1.0	0.05	0.12	VP	
S6H-D		S-65H	99.4	0.7	0.04	0.08	HP	
I2H-D		I-220H	98.6	1.9	0.01	0.06	HP	
ABE-D	Be-Al	Al BeMet	62.4	-	36.98	0.15	HP	

*1 BRUSHMILLMAN

*2 Vacuum Hot Press

(Hot Isostatic Press)

3-2

ID			mm			
			/			
S2F-1		S-200F	10× 10×	1.388/0.006		EMAR
S2F-1Y		S-200F	10× 10×	1.561/0.007		EMAR
S2F-5		S-200F	10× 24×	5.006/0.005		EMAR
S6C-D		S-65C	10×	1.391/0.001		EMAR
ABE-1	Be-Al	Al BeMet	10× 10×	1.569/0.004		EMAR
S2F-D		S-200F	10×	1.506/0.002		EMAR
S2F-5I		S-200F	10× 55×	5.094/0.004		EMAR ^{*1}
S6H-D		S-65H	10×	1.507/0.003		EMAR
S6H-5I		S-65H	10× 55×	5.076/0.003		EMAR ^{*1}
I2H-D		I-220H	10×	1.495/0.002		EMAR
I2H-5I		I-220H	10× 55×	5.062/0.002		EMAR ^{*1}
ABE-D	Be-Al	Al BeMet	10×	1.000/0.001		EMAR

*1:

14mm× 4mm

3-3

ID				XRD	C
S2F-1		S-200F	10× 10× 1.4 1.6 mm		
S2F-5		S-200F	10× 10× 5 mm		
S6C-D		S-65C	10× 1.4 mm		
ABE-1	Be-Al	Al BeMét	10× 10× 1.6 mm		
S2F-D		S-200F	10× 1.5 mm		
S6H-D		S-65H	10× 1.5 mm		
I2H-D		I-220H	10× 1.5 mm		
ABE-D	Be-Al	Al BeMét	10× 1 mm		

3-4

ID			mm	km/s		
				*1	/ ^{*2} ()	/ ^{*2} ()
S2F-1	Be	S-200F	10× 10× (1.388/0.006)	A	9.21/0.31 3	12.86/- (2)
				W	9.13/ - 2	-
S2F-1Y	Be	S-200F	10× 10× (1.561/0.007)	A	9.19/0.26 4	12.75/- 1
				W	9.13/0.28 3	-
S2F-5	Be	S-200F	10× 24× (5.006/0.005)	A	9.11/0.06 11	-
				W	9.06/0.04 11	-
S6C-D	Be	S-65C	φ10× (1.391/0.001)	A	9.73/0.02 2	12.99/0.65 3
				W	9.73/0.02 2	13.02/0.70 3
ABE-1	Be-Al	Al BeMét	10× 10× (1.569/0.004)	A	6.51/0.04 5	-
				W	6.57/0.12 4	-
S2F-D	Be	S-200F	φ10× (1.506/0.002)	A	9.20/0.26(4)	12.76/- (2)
S2F-5I	Be	S-200F	10×55× (5.094/0.004)	A	9.07/0.07(11)	-
S6H-D	Be	S-65H	φ10× (1.507/0.003)	A	9.17/0.25(3)	12.74/- (1)
S6H-5I	Be	S-65H	10× 55× (5.076/0.003)	A	9.10/0.07(9)	-
I2H-D	Be	I-220H	φ10× (1.495/0.002)	A	9.19/- (2)	12.68/- (1)
I2H-5I	Be	I-220H	10× 55× (5.062/0.002)	A	9.10/0.09(11)	-
ABE-D	Be-Al	Al BeMét	φ10× (1.000/0.001)	A	6.60/0.15 3	10.40/- 2
				A ^{*3}	6.61/0.15 3	10.40/- 2

*1: A= W *2 = *3

3-5

ID			nm		kn/s		
			/		/ ^{*2}	/ ^{*2}	
S2F-1	Be	S-200F	10x 10x 1.388/0.006	A	9.21/0.31 3	12.86/ (2)	1.396
S2F-1Y	Be	S-200F	10x 10x 1.561/0.007	A	9.19/0.26 4	12.75/ 1	1.387
S2F-D	Be	S-200F	10x 1.506/0.002	A	9.20/0.26(4)	12.76/ (2)	1.387
S2F-5I	Be	S-200F	10x55x 5.094/0.004	A	9.07/0.07(11)	-	-
S2F-5	Be	S-200F	10x 24x 5.006/0.005	A	9.11/0.06 11	-	-
S6H-D	Be	S-65H	10x(1.507/0.003)	A	9.17/0.25(3)	12.74/ (1)	1.389
S6H-5I	Be	S-65H	10x55x(5.076/0.003)	A	9.10/0.07(9)	-	-
I2H-D	Be	I-220H	10x(1.495/0.002)	A	9.19/- (2)	12.68/ (1)	1.380
I2H-5I	Be	I-220H	10x55x(5.062/0.002)	A	9.10/0.09(11)	-	-

*1: A=
*2 =

3-6

ID			(wt%)*1					10 ⁸ m *3		km/s *4	
			Be	BeO	Al	Fe					
S2F-1		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.1	VP *2	4.41	-	9.21	-
S2F-1Y		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.1	VP	-	-	9.19	
S2F-5		S-200F	99.1	1.1	0.04	0.1	VP	4.32	-	-	-
S6C-D		S-65C	99.4	0.7	0.02	0.06	VP	4.47	-	9.73	Be
ABE-1	Be-Al	Al BeMét	60-64	-	Bal.	-	HP *2	3.32	-	6.51	-
S2F-D		S-200F	99	1.0	0.05	0.12	VP	-	4.35	9.20	-
S6H-D		S-65H	99.4	0.7	0.04	0.08	HP	-	3.93	9.17	
I2H-D		I-220H	98.6	1.9	0.01	0.06	HP	-	4.34	9.19	
ABE-D	Be-Al	Al BeMét	62.4	-	37	0.15	VP	3.65	3.61	6.60	-

*1: JAEA BRUSHWELLMAN
 *2 Vacuum Hot Press (Hot Isostatic Press)
 *3 2009/10/29 2010/1/20
 *4 1.0-1.5mm

(EMAR)

(TEM)

NFD

4 1

NFD

NFD

(S-65H)

(Be-Al)

4 1

4 2

JMR

8

(JRR-3

10

)

10

4 3

(1g

)

4 2

NFD

4 4

TEM

3mm x 1mm

TEM

3mm x 0.2mm

NFD

(EMAR)

TEM

() FE-TEM ()

4 5

x

Fe-55 Fe-59 Mn-54 Cr-51

Co-60

H 3

FE-TEM

Be-10

Be-10

H3

30 500

EMR

4-6

4 1

(S-65-H)

(Be-Al)

S-65-H	Be	Al	C	Fe	Mg	Si	Cr	Co
	99.4	0.040	0.010	0.080	0.010	0.02	0.010	0.010
	Cu	N	Mn	Ag	Ca			
	0.010	0.020	0.010	0.0003	0.002			
Be-Al	Be	Al	C	Fe	Mg	Si	Cr	Co
	63.3	36.17	0.049	0.148	0.016	0.049	0.013	0.010
	Cu	N	Mn	Ti	N			
	0.027	0.019	0.010	0.017	0.0145			

4 2

	$2.0 \times 10^{14} \text{n/cm}^2/\text{s}$
	$5.0 \times 10^{13} \text{n/cm}^2/\text{s}$
	6000
	10

4 3

	(Bq/g)	
	S-65-H	Be-Al
H-3	9.10×10^0	5.77×10^0
Be-10	3.73×10^4	2.37×10^4
Fe-55	3.60×10^7	6.66×10^7
Fe-59	4.81×10^6	8.91×10^6
Mn-54	8.38×10^6	1.55×10^6
Cr-51	1.27×10^8	1.64×10^8
Co-60	6.48×10^8	6.48×10^8

4-4

	(nm)	(g)
	10× 1.5 S-65-H	0.25
	10× 1 Be-Al	0.2
	5× 10× 55 S-65-H	5.5
TEM	3× 0.2 S-65-H/Be-Al	0.004*

* 3mm× 1mm 0.02g

4-5

1

- 1

	(Bq)	S-65-H (0.25g)		Be-Al (0.2g)	
		(Bq)		(Bq)	
H-3	1.11×10^9	2.28×10^{10}		1.15×10^{10}	
Be-10		9.33×10^3	×	4.74×10^3	×
Fe-55	3.59×10^{14}	9.00×10^6		1.33×10^7	
Fe-59	2.00×10^{12}	1.20×10^6		1.78×10^6	
Mn-54	8.00×10^{12}	2.10×10^6		3.10×10^5	
Cr-51	1.00×10^{13}	3.18×10^7		3.28×10^7	
Co-60	2.84×10^{14}	1.62×10^8		1.30×10^8	

- 2

	(Bq)	S-65-H (5.5g)	
		(Bq)	
H-3	1.11×10^9	5.01×10^{11}	
Be-10		2.05×10^5	×
Fe-55	3.59×10^{14}	1.98×10^8	
Fe-59	2.00×10^{12}	2.65×10^7	
Mn-54	8.00×10^{12}	4.61×10^7	
Cr-51	1.00×10^{13}	6.99×10^8	
Co-60	2.84×10^{14}	3.56×10^9	

- 1

	(Bq)	S- 65- H (0.25g)		Be- Al (0.2g)	
		(Bq)		(Bq)	
H 3		2.28×10^{10}	×	1.15×10^{10}	×
Be- 10		9.33×10^3	×	4.74×10^3	×
Fe- 55	8.00×10^{12}	9.00×10^6		1.33×10^7	
Fe- 59	2.00×10^{11}	1.20×10^6		1.78×10^6	
Mn- 54	1.00×10^{12}	2.10×10^6		3.10×10^5	
Cr- 51	1.00×10^{13}	3.18×10^7		3.28×10^7	
Co- 60	4.00×10^{12}	1.62×10^8		1.30×10^8	

- 2

	(Bq)	S- 65- H (5.5g)	
		(Bq)	
H 3		5.01×10^{11}	×
Be- 10		2.05×10^5	×
Fe- 55	8.00×10^{12}	1.98×10^8	
Fe- 59	2.00×10^{11}	2.65×10^7	
Mn- 54	1.00×10^{12}	4.61×10^7	
Cr- 51	1.00×10^{13}	6.99×10^8	
Co- 60	4.00×10^{12}	3.56×10^9	

TEM

	(Bq)	S- 65- H (0.004g)		Be- Al (0.004g)	
		(Bq)		(Bq)	
H 3	3.70×10^6	3.64×10^8		2.31×10^8	
Be- 10		1.49×10^2	×	9.48×10^1	×
Fe- 55	5.00×10^8	1.44×10^5		2.66×10^5	
Fe- 59	3.00×10^6	1.92×10^4		3.56×10^4	
Mn- 54	5.00×10^6	3.35×10^4		6.20×10^3	
Cr- 51	3.00×10^7	5.08×10^5		6.56×10^5	
Co- 60	1.00×10^8	2.59×10^6		2.59×10^6	

FE-TEM TEM

	(Bq)	S-65-H (0.004g)		Be-Al (0.004g)	
		(Bq)		(Bq)	
H-3		3.64×10^8	×	2.31×10^8	×
Be-10		1.49×10^2	×	9.48×10^1	×
Fe-55	2.00×10^7	1.44×10^5		2.66×10^5	
Fe-59	6.00×10^4	1.92×10^4		3.56×10^4	
Mn-54	5.00×10^6	3.35×10^4		6.20×10^3	
Cr-51	6.00×10^6	5.08×10^5		6.56×10^5	
Co-60	8.00×10^6	2.59×10^6		2.59×10^6	

4-6

		Be-10 H-3
TEM		Be-10 H-3
TEM	FE-TEM	H-3 Be-10

Be-10 NFD

5.1

(1)

(2) Be
EMAR

(3) Be (75 100) He
(12μ cm²/1%He) 20dpa

(4) SUS /

5.2

(1) Be A 40wt% Be-Al (ABE-1, ABE-D) 3.5μ cm
Al Be (4.4μ cm) 80 (SGHD)
(3.9μ cm)

X
(1) Be (SGC-D ABE-1) X JCPDS

(1) Be Be
(2) Be C
(3) 13,087m/s 9,003m/s (/)
1.454 C
13,916m/s 9,384m/s (/) 1.438

(1) Be

(2) EMAR (1.0-1.5nm)

5nm

(3) S2F-5I/S6H5I/I2H5I 9.07(0.07)

/9.10(0.07)/9.10 0.09km/s

(4) Be Be EMAR

(5) Be-Al 6.5-6.6km/s Be 70

(6) (/) S2F-D/S6H D/I2H D/ABE-D

1.387/1.389/1.380/1.575 Be

(1.38-1.39) Be-Al (ABE-D) Be 1.58

5.3

EMAR

TEM NFD

Be-10

H3

5.4

JMR

- [1] Edited by C R Tipton, Reactor handbook – Second edition in four volumes - , Interscience Publishers, Inc., New York, (1960) p. 897.
- [2] J. M Beeston, “ Beryllium Metal as a neutron Moderator and Reflector Material ” , Nucl. Eng. Des., 14 (1970) pp. 445-474.
- [3] JMR
JAERI - Tech 2003-051 (2003).
- [4] p1266, p1268(1992).
- [5] M Hrao, H Ogi, “ EMATs for Science and Industry –Noncontacting Ultrasonic Measurements” , Kluwer Academic Publishers, London (2003).
- [6] “
” Vol. 55, No. 4 p. 416(2006).
- [7] “
” Vol. 56, No. 2 p. 114(2007).
- [8] MHrao, H Ogi, N Suzuki, Ohtani “ Ultrasonic Attenuation Peak During Fatigue of Polycrystalline copper” Acta Mater., 48 p. 517(2007).
- [9] HN shi da, H Yanaguchi, M Yoshi da, "Use of Electromagnetic Resonance Method to Detect Micro-Voids via Evaluation of Ultrasonic Wave Attenuation Coefficient of SUS304 Steel Fabricated by Hot Isotropic Press", JSME Inter. Journal, Series A, Vol. 44, No. 1 (2001).
- [10] A Vary, “ Correlations between Ultrasonic and Fracture Toughness Factors in Metallic Materials” , ASTMSTP 677, p. 563 (1979).

- [11] R B Thompson, " Ultrasonic Measurement of Mechanical Properties" , 1996 IEEE ULTRASONIC SYMPOSIUM p. 735 (1996).
- [12] Beeston, J.M, " Fracture Toughness of Irradiated Beryllium" , ASTMSTP 683, 309 (1979).
- [13] S. Sato, et al., " Degradation of Thermal Shock Resistance and Fracture Toughness of Neutron Irradiated Reactor Graphite" , J. Nucl. Sci. Tech., 24[7] p. 547 (1987).
- [14] R Kasada, et al., " Relation between resistivity and mechanical properties in heat affected zone of pressure vessel steel" , ASTMSTP 1405, p. 315 (2001).
- [15] " " P19, " " 2007 (2007).
- [16] " " " " 2008 51 (2008).
- [17] " " " " 2008 52 (2008).
- [18] A Migliori, et al., "Beryllium's monocrystal and polycrystal elastic constants," J. Appl. Physics, Vol. 95, No. 5, p. 2436 (2004).
- [19] WD Rowland, J.S. White, "The determination of the elastic constants of beryllium in the temperature range 25 to 300 °K," J. Phys. F: Metal Phys., Vol. 2, p. 231 (1972).
- [20] K Bennett, et al., " Texture Development in S200-D -E and P31664 Beryllium Blocks from Neutron Diffraction Spectra" , Scripta Materialia, Vol. 40, No. 7, p. 825 (1999).
- [21] R W Margevicius, et al., " Effect of Crystallographic Texture on Sound Velocity Propagation in Polycrystalline Beryllium" , Fusion Science and Technology, Vol. 41, p. 286 (2002).
- [22] L A Hall, " Survey of Electrical Resistivity Measurements on 16 Pure Metals in the Temperature Range 0 to 273K" , NBS Technical Note 365 (1968).
- [23] R C Fernow " Heating in the Study 2a Absorber Window" , MIC-NOIE-COOL_THEORY-317, (2005).
- [24] J. Delaplace, et al., " Low temperature neutron radiation damage and recovery in beryllium" , Phys. Stat. Sol. 29, p. 819 (1968).
- [25] B S. Hickman, G T. Stevers, " The effect of neutron irradiation on beryllium" , AAEC/E 109, (1963).

- [26] F. A. Garner, et al., "Application of Miniature Tensile Specimens to Studies of Radiation Damage in Metals," ASTM Inter. Symp. on small specimen test techniques and their applications to pressure vessel annealing and plant life extension, PNL-SA-19682, De92 019080, (1992).
- [27] V. P. Chakin, I. B. Kupriyanov, R. R. Melder, "State of Beryllium after Irradiation at Low Temperature up to Extremely High Neutron Dose", J. Nucl. Mater., 329-333, p. 1347(2004).
- [28] V. P. Chakin, A. O. Posevin, I. B. Kupriyanov, "Swelling Mechanical Properties and Microstructure of Beryllium Irradiated at 200 up to Extremely High Neutron Dose", J. Nucl. Mater., 367-370, p. 1377(2007).
- [29] , , " , " , p. 75 (10 6).
- [30] M. H. Rao, H. Ogi, "Electromagnetic acoustic resonance and materials characterization," Ultrasonics, 35, pp. 413-421(1997).
- [31] " " 43 12 764 6 .
- [32] J. F. Nye, "Physical properties of crystals," Clarendon Press, New York(1973).
- [33] H. S. Rosenbaum "Use of pole figure data to compute elasticity coefficients of Zirconium sheet," J. Nucl. Mater., 67, p. 273(1977).
- [34] T. Koniishi, M. Hori, "Texture effect of Zircaloy on ultrasonic velocity", ASTM STP, 824, p. 256(1984).
- [35] E. Schreiber, et al., "Elastic constants and their measurements", McGraw Hill, New York, (1973).

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみに使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクタ	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

