

高速増殖原型炉「もんじゅ」 背後斜面の地震時健全性評価

Seismic Safety Analysis of Rear Slope of Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"

伊藤 啓 大島 宏之 Kei ITO and Hiroyuki OHSHIMA

次世代原子力システム研究開発部門 FBR 要素技術開発ユニット

FBR Systems Technology Development Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

March 2011

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

高速増殖原型炉「もんじゅ」背後斜面の地震時健全性評価

日本原子力研究開発機構次世代原子力システム研究開発部門 FBR 要素技術開発ユニット 伊藤 啓、大島 宏之

(2010年12月17日 受理)

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂されたことに伴い、高速増殖原型 炉「もんじゅ」においても、改訂された指針(新指針)に照らした耐震安全性評価を実施 している。本研究では、評価対象の1つである原子炉建物背後斜面の地震時健全性を確認 するため、機構論的手法を用いた数値解析を実施した。

個別要素法(Distinct Element Method: DEM)を用いた数値解析では、3 軸試験の数値解 析等を行うことで粒子間結合などのモデル係数を適切に設定し、地震動をパラメータとし て背後斜面の健全性を評価した。その結果、基準地震動に対して背後斜面が完全に健全性 を保つことを確認した。また、粒子法(Moving Particle Semi-implicit: MPS)を用いた数値 解析では、流動化状態を仮定しビンガム流体モデルを用いて背後斜面の挙動を評価した。 その結果、個別要素法解析においては、流体仮定を用いているために土砂の移動を防止す ることはできなかったが、移動量は最大でも数十メートル程度であり、背後斜面が大規模 崩落して原子炉建屋等に到達することは無い、ということを確認した。

以上の解析結果から、「もんじゅ」背後斜面は基準地震動に対して十分な裕度を有して いると考えられる。

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

Seismic Safety Analysis of Rear Slope of Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"

Kei ITO and Hiroyuki OHSHIMA

FBR Systems Technology Development Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2010)

In accordance with the revision of "Regulatory guide for seismic design of nuclear power plants", the seismic safety assessment of the prototype fast breeder reactor "Monju" was carried out based on the revised guide. In this assessment, the seismic behavior of the sloping land behind "Monju" was analyzed using mechanistic simulation methods; the distinct element method (DEM) and the moving particle semi-implicit (MPS) method.

In the DEM simulations, inter-particle behaviors were modeled appropriately based on the simulation results of triaxial compression tests and the seismic behavior was evaluated in the simulation cases of various seismic wave amplitudes. As a result, the revised design earthquake ground motion did not cause any collapse (landslide) on the sloping land. On the other hand, in the MPS simulations, the sloping land was modeled as a fluidized layer by using the Bingham model. The simulation results showed that the movement of the surface layer was at most several tem meters and therefore, landslide could not reach the "Monju" plant even in this extremely conservative analysis.

In conclusion, the mechanistic simulations showed that the sloping land of "Monju" had a sufficient seismic safety against the revised design earthquake ground motion.

Keywords: Numerical Simulation, Landslide, Seismic Safety, DEM, MPS, Monju

目次

1. 序論		1
0 [37	12.1. 百乙后冲船北公公工。积七久休	2
2. I Uh	しゆ」原士炉建物育夜料面の脾竹条件	
2.1		2
2.2	解析体糸・人力地震動	2
3. 個別	要素法(DEM)解析	3
3. 1	粒子モデル	3
3. 2	粒子間結合モデル	5
3. 3	粒子パラメータの決定法	7
3.4	初期条件	7
3.5	解析ケース	8
3. 6	解析結果	8
1 粉子	注(MDS) 解析	0
4. 心丁	仏(MFS)神句	
4.1	WITS の似女	
4.2	低析田物性値の設定	
4.5	解析 币彻 庄 恒 ⑦ 段 足	
4.4	解初末日	
4.0	胜切和本	11
5. 結論		12
参考文献		13
付録1.1	3 軸圧縮試験解析による限界応力値設定	24
付録2.	DEM 解析における初期状態の作成手法	28

Table of Contents

1. Introd	luction	1
2. Simul	ation conditions of Rear Slope of Prototype Fast Breeder Reactor "Monju"	· 2
2.1	Description of Rear Slope	2
2. 2	Simulation Domain & Input Seismic Wave	2
3. DEM	Simulations	3
3. 1	Particle Modeling	3
3. 2	Inter-particle Modeling	5
3. 3	Particle Parameter Setting	7
3. 4	Initial Condition	7
3.5	Simulation Cases	8
3. 6	Simulation Results	8
4. MPS	Simulations	9
4. 1	Description of MPS	9
4.2	Bingham Model	9
4. 3	Physical Properties Setting	10
4.4	Simulation Conditions	10
4. 5	Simulation Results	11
5. Concl	usion	12
Reference		13
Appendix	1. Critical Stress Setting by Simulations of Triaxial Compression Tests	24
Appendix	2. Build Process of Initial Condition in DEM Simulations	29

表リスト

Table 1	Physical properties of the rear slope (D-layer)	15
Table 2	Physical properties for DEM simulation	15
Table A1	Simulation result of triaxial compression tests	25

図リスト

The rear slope of "Monju"	16
Vertical cross-section of the rear slope	16
Simulated region of the rear slope (D-layer)	16
Seismic waves (Ss): (a) Vertical direction, (b) Horizontal direction	17
Distinct element (Voigt) modeling of particle interactions:	18
(a) Normal direction, (b) Tangential direction, (c) Overlap of two particles	18
Inter-particle adhesion modeling	18
Initial particle distribution for the DEM simulation	19
Particle distribution at $t = 30.0$ s in the DEM simulation result of Case 1	19
(reference case)	
Particle distribution at $t = 30.0$ s in the DEM simulation result of Case 2	19
(the weakened bond case)	
DEM simulation result of Case 3 (five times amplitude case) at $t = 10.0$ s:	20
(a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds	20
DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 10.0$ s:	20
(a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds	20
DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 30.0$ s:	20
(a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds	20
bi-viscosity model	21
Measured viscosity of liquefaction soil	21
Initial particle distribution: (a) Bird's eye view, (b) Vertical cross-section	22
Particle distribution at $t = 100$ s without the earthquake	22
Particle distributions and displacements at $t = 100$ s:	23
(a) $\mu = 1.0 \text{ Pa*s}$, (b) $\mu = 5.0 \text{ Pa*s}$, (c) $\mu = 10 \text{ Pa*s}$	23
Simulation domain of triaxial compression tests:	25
(a) Cylindrical container	25
(b) Vertical cross-section and particle distribution (test sample)	25
	The rear slope of "Monju" Vertical cross-section of the rear slope Simulated region of the rear slope (D-layer) Seismic waves (Ss): (a) Vertical direction, (b) Horizontal direction Distinct element (Voigt) modeling of particle interactions: (a) Normal direction, (b) Tangential direction, (c) Overlap of two particles Inter-particle adhesion modeling Initial particle distribution for the DEM simulation Particle distribution at $t = 30.0$ s in the DEM simulation result of Case 1 (reference case) Particle distribution at $t = 30.0$ s in the DEM simulation result of Case 2 (the weakened bond case) DEM simulation result of Case 3 (five times amplitude case) at $t = 10.0$ s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 10.0$ s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 30.0$ s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 30.0$ s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at $t = 30.0$ s: (a) Particle distribution; (b) Distribution of the destroyed bonds bi-viscosity model Measured viscosity of liquefaction soil Initial particle distribution: (a) Bird's eye view, (b) Vertical cross-section Particle distributions and displacements at $t = 100$ s: (a) $\mu = 1.0$ Pa*s, (b) $\mu = 5.0$ Pa*s, (c) $\mu = 10$ Pa*s Simulation domain of triaxial compression tests: (a) Cylindrical container (b) Vertical cross-section and particle distribution (test sample)

Fig. A2	Simulation procedure of triaxial compression tests:		
	(a) Compression of the wall region to achieve the wall pressure of σ_3	26	
	(b) Compression of the central region	26	
	(c) Mohr's stress circle	27	
	(d) Mohr-Coulomb equation	27	
Fig. A3	Build process of the initial particle distribution:	29	
	(a) Inter-layer partitions and a surface cover	29	
	(b) Particle filling	29	
	(c) Compression of particle layers	29	
	(d) Deletion of the partitions	29	

1. 序論

「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が改訂されたことに伴い、高速増殖原型炉「もんじゅ」においても、改訂された指針(新指針)に照らした耐震安全性評価を実施している。その一環として、評価対象の1つである原子炉建物背後斜面について、二次元動的有限要素法解析によるすべり安定性の評価を行った結果、すべり安全率が十分に高いこと(基準地震動に対して背後斜面が健全であること)を確認している^[1]。

本研究では、背後斜面の崩壊挙動に関する知見を得ることを目的として、機構論的手法を用いた数値 解析を実施する。まず、個別要素法(Distinct Element Method: DEM)^[2-5]を用いた数値解析を実施し、 背後斜面の崩壊挙動について調査する。その際、数値実験等に基づいて粒子モデルを構築し、また、地 震動をパラメータとして背後斜面の健全性を評価する。次に、粒子法(Moving Particle Semi-implicit: MPS)^[6]を用いて、流動化状態を仮定した背後斜面の挙動を評価する。この際も、流動化土砂に関する 既往実験等に基づき、適切なモデルパラメータを設定して解析を実施する。

2. 「もんじゅ」原子炉建物背後斜面の解析条件

2.1 背後斜面の概要

本研究では、Fig. 1 に示す「もんじゅ」原子炉建物背後斜面を対象とした数値解析を実施する。解析 対象断面の地質分布を Fig. 2 に示す。背後斜面は花崗岩から成っているが、物性値の違いによって、D 層、CL層、CM層などに分類されている^[7]。表面に存在する D層物性値を Table 1 に示す。表中に示す 通り、D層は異なる物性値を有する 3 つの層に分類されており、ここでは、最表面(地表から深さ 5 m まで)に位置する風化層を α 層、最深部に位置する地下水を含む層を γ 層、両者の間に位置する層を β 層 と呼ぶ。

2.2 解析体系·入力地震動

背後斜面に対する有限要素法解析の結果、表面に存在する D 層の崩壊が最も発生し易い(すべり安全 率が低くなる)と考えられているため、本研究では D 層を対象として数値解析を実施した。Fig. 3 に解 析体系を示す。実際の数値解析においては、本解析体系中に粒子を配置し、地震動を与えた際の非定常 挙動を調査する。解析体系の奥行き方向長さは、個別要素法(DEM)解析において 1.4 m、粒子法(MPS) 解析において 20 m である。

Fig.4に、解析で与える基準地震動(Ss)を示す。本地震動は、水平方向で最大 760 Gal、垂直方向で 最大 507 Gal の加速度を有している。DEM 解析においては、本地震動の振幅を 5 倍、10 倍したケース についても評価を実施する。

3. 個別要素法(DEM)解析

本章では、DEM を用いた数値解析について示す。尚、本研究では汎用 DEM 解析コード EDEM^[8]を用いて背後斜面の解析を実施した。

3.1 粒子モデル

DEMは、解析対象を多数の球形粒子で模擬し、各粒子の運動をLagrange的に計算することによって、 解析対象の動的挙動(並進・変形・分裂・合体等)を求める手法である。既往研究において地震時の斜 面崩落挙動を解析した例^[9-12]もあり、背後斜面を解析する手法としては適切であると考えられる。DEM において、各粒子の運動方程式は以下のように表される。

$$\vec{F} = m\vec{a} \tag{1}$$

ここで、mは粒子1個あたりの質量、 \vec{a} は粒子の加速度である。また、 \vec{F} は粒子に作用する力(接触力・ 付着力・重力等の合力)であり、後述する通り DEM によって算出する。

粒子間力を計算するためのモデルを Fig. 5 に示す。本モデルは所謂 Voigt モデルであり、粒子が接触 している場合の反発力をバネによって表し、内部摩擦による運動エネルギーの減衰をダッシュポットに よって表している。テンションジョイントは粒子間の付着力を表すモデルであり、3.2 節において説明 する。法線方向の粒子間力 *F*_n は以下の式で表される^[13]。

- Spring

$$F_n^s = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}},$$
 (2)

- Dashpot

$$F_{n}^{d} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{s_{n}m^{*}v_{n}^{rel}},$$
(3)

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}},\tag{4}$$

$$s_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_n} \ . \tag{5}$$

式 2 は、バネによる法線方向の力 F_n^s が、接触している 2 粒子の法線方向オーバーラップ量 δ_n によって 決定されることを示している。ここで、接触している 2 粒子(1 および 2)の δ_n は以下の式で計算でき る。

$$\delta_n = (R_1 + R_2) - d_{12} , \qquad (6)$$

ただし、 d_{12} は粒子 1 と 2 の中心間距離である。また、式 2 中の E^* は等価縦弾性係数、 R^* は粒子の等価 半径であり、以下の式で計算される。

$$E^* = \left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}\right)^{-1},\tag{7}$$

$$R^* = \left(1/R_1 + 1/R_2\right)^{-1},\tag{8}$$

ただし、vはポワソン比である。式3は、ダッシュッポットによる法線方向の力 F_n^d が、接触している2 粒子間の法線方向相対速度 v_n^{rel} によって決定されることを示している。ただし、eは反発係数、 m^* は等価 質量であり、接触している2粒子について、以下の式で計算される。

$$m^* = \left(1/m_1 + 1/m_2\right)^{-1}.$$
(9)

接線方向の粒子間力 Ft は以下の式で表される^[13]。

- Spring & Slider

$$F_{t}^{s} = \frac{4}{3}G^{*}\sqrt{R^{*}}\delta_{t}^{\frac{3}{2}},$$

$$if \quad |F_{t}^{s}| > \mu F_{n}^{s}, \qquad F_{t}^{s} = \mu F_{n}^{s},$$
(10)

- Dashpot

$$F_{t}^{d} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{s_{t}m^{*}v_{t}^{rel}},$$
(11)

$$s_t = 2G^* \sqrt{R^* \delta_t} \ . \tag{12}$$

式 10 は、バネによる接線方向の力 *F*^s が、接触している 2 粒子の接線方向オーバーラップ量&によって 決定されることを示している。ここで、&は以下の式で計算できる。

$$\delta_t = 2\sqrt{R^* \delta_n} \,. \tag{13}$$

ただし、クーロンの摩擦法則から得られるせん断力より大きい力が作用することは無いため、摩擦スラ イダーによって法線方向の力(バネによる力)に対する法線方向せん断力の上限が決められている。式 11 は、ダッシュッポットによる接線方向の力 *F*^d が、接触している 2 粒子間の接線方向相対速度 *v*^{rel} によ って決定されることを示している。ここで、*μ*は摩擦係数、*G*^{*}は等価横弾性係数であり、接触している 2 粒子について、以下の式で計算される。

$$G^* = \left(\frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2}\right)^{-1},\tag{14}$$

3.2 粒子間結合モデル

本研究では、テンションジョイントモデル^[14]によって、粒子間の結合(付着力)を模擬している。Fig. 6 にモデルの概要を示す。テンションジョイントモデルでは、結合している粒子間の相対位置を保つた め、各時刻において粒子間の相対変位と逆向きの力を発生させる。即ち、各時刻における付着力の変化 量は、以下の式で表される。

- Normal direction

$$\delta F_n^b = -k_n A v_n^{rel} \delta t \,, \tag{15}$$

- Tangential direction

$$\delta F_t^b = -k_t A v_t^{rel} \delta t , \qquad (16)$$

- Rotational directions

$$\delta M_n^b = -k_t J \omega_n^{rel} \delta t , \qquad (17)$$

$$\delta M_t^b = -0.5k_n I \omega_t^{rel} \delta t , \qquad (18)$$

ただし、& は解析における時間刻み幅、k_nおよびk_tは付着部の法線方向および接線方向剛性であり、付着部の縦弾性係数 E'および係数比 k を用いて、以下のように表される。

$$k_n = \frac{E'}{R_1 + R_2} \,, \tag{19}$$

$$k_t = \frac{k_n}{k} \,. \tag{20}$$

また、A は付着部の断面積であり、以下の式で表される。

$$A = \pi \overline{R}^2, \tag{21}$$

ただし、*R*は付着部の半径であり、係数*A*を用いて以下の式で求められる。

$$\overline{R} = \lambda \min(R_1, R_2).$$
⁽²²⁾

式 17 は結合している 2 粒子の中心を結ぶ軸周りの回転(ねじりモーメント)、式 18 はその軸と直交する方向の回転(曲げモーメント)を表しており、 ω_n^{rel} および ω_l^{rel} はそれぞれの方向における相対角速度である。また、それぞれの回転軸に関する完成モーメント(*J*および *I*)は、以下の式で計算される。

$$J = \frac{1}{2}\pi \overline{R}^{4},$$

$$I = \frac{1}{4}\pi \overline{R}^{4}.$$
(23)
(24)

粒子間の結合は、法線方向もしくは接線方向の引張り応力が限界値より大きくなった場合に破壊され、 それ以降、粒子間に付着力は作用しない。結合が破壊される条件は、以下の式で表される。

- Normal direction

$$\sigma_{\max} < \frac{F_n^b}{A} + \frac{2\left|M_t^b\right|}{I}\overline{R}, \qquad (25)$$

- Tangential direction

$$\tau_{\max} < \frac{\left|F_{\iota}^{b}\right|}{A} + \frac{\left|M_{n}^{b}\right|}{J}\overline{R}, \qquad (26)$$

ただし、 σ_{max} および τ_{max} は、法線方向および接線方向の限界応力値である。

3.3 粒子パラメータの決定法

背後斜面の数値解析を行うにあたり、粒子モデルおよび粒子間結合モデルにおけるパラメータを設定 する必要がある。

まず、背後斜面挙動を精度良く解析する観点から、斜面が崩壊する場合の典型的なスケールとして斜面中に存在する岩石に注目する。この岩石が直径 1~2 m 程度であるため、より小さなスケールで解析を行うこととし、粒子半径 R を 0.2 m と定める。粒子密度は背後斜面の密度 (Table 1 参照) と等しいとし、粒子質量 m は粒子半径および粒子密度から計算する。次に、粒子の縦弾性係数 E および横弾性係数 G に関しては、計測された値を与える。付着部の縦弾性係数 E'については、解析の保守性を担保するため、α層において計測された縦弾性係数 (3 層の中で最も小さい値)を与える。係数λおよび k については、 テンションジョイントモデルの元論文^[14]に倣い、それぞれ 1.0 および 2.5 とする。

摩擦係数 μ 、反発係数eおよび応力限界値(σ_{max} および τ_{max})は、3軸試験の数値解析によって決定する。即ち、解析結果に基づくモール・クーロンの破壊包絡線が計測結果と整合するように、これらの値を決定する^[15]。3軸試験の数値解析に関しては、付録1に示す。

これらの粒子パラメータを Table 2 に示す。

3.4 初期条件

D 層の粒子モデルを作成するため、まず、 α 、 β 、 γ の各層境界に仕切りを置いた上で各層の領域に粒子を充填し、仕切りを取り外すとともに粒子を結合させることで初期状態(Fig. 7 参照)を形成する。初期条件形成方法の詳細については、付録 2 に示す。

本解析では解析体系の奥行き方向長さを 1.4 m としているため、奥行き方向の粒子数は 3.5 個程度で ある。体系奥行き方向長さの影響については、単純体系における検証解析を実施しており、奥行き方向 長さが小さいほど粒子間結合が破壊され易く、保守的な(斜面が崩壊し易い)解析結果が得られること を確認している。

3.5 解析ケース

解析は以下の4ケースについて実施した。

- ケース1(Reference ケース): 3.3 節で決定した粒子パラメータを用い、基準地震動を付与;
- ケース 2: Reference ケースの物性値のうち、応力限界値 (σ_{max} および τ_{max})を半分にするとともに反発係数 eを 1.0 とした保守的 (斜面が崩壊し易い)条件で、基準地震動を付与;
- ケース3: Reference ケースと同じ粒子パラメータを用い、基準地震動の振幅を5倍にして付与;

ケース4: Reference ケースと同じ粒子パラメータを用い、基準地震動の振幅を10倍にして付与.

3.6 解析結果

Fig. 8 にケース1 (Reference ケース)の解析結果を示す。地震動を 30 秒間与えた状態において、背後 斜面は全く変形していない。実際に粒子間の結合状態を調査しても、30 秒間で破壊された結合はわずか 0.08 % (α 層: 0.13 %、 β 層: 0.06 %、 γ 層: 0.06 %) であり、斜面は完全に健全性を保っている。保守的 な粒子パラメータを与えたケース 2 の結果を Fig. 9 に示す。本ケースにおいても、30 秒後の背後斜面が 崩落する挙動は全く見られない。粒子間の結合に関しても、ケース 1 よりは破壊される結合数が増加す るものの 30 秒の時点でわずか 0.20 % (α 層: 0.41 %、 β 層: 0.14 %、 γ 層: 0.10 %) であり、斜面は明ら かに健全である。

Fig. 10 に地震動の振幅を5 倍にしたケース3 の解析結果を示す。本解析は10 秒間実施したが、10 秒の時点で破壊された結合は約1%であり背後斜面が崩落する兆候は観察されないため、振幅5倍条件においても斜面は健全性を保つと判断できる。更に振幅を増加させたケース4(振幅10倍)の解析結果をFig. 11 およびFig. 12 に示す。非常に大きな地震動を与えた本ケースでは、10秒の時点において既に約18%の結合が破壊されており、背後斜面の表面近傍において粒子が崩落している。30秒の時点では更に多くの粒子間結合(約27%)が破壊され、α層において亀裂が発生し、多数の粒子が崩落する挙動を観察できる。しかし、斜面内部において明らかなすべり線は形成されておらず、従って、地滑りのような大規模な斜面崩落は発生していない。

4. 粒子法 (MPS) 解析

本章では、東京大学にて開発された粒子法(MPS)を用いて、背後斜面の数値解析を実施する。

4.1 MPS の概要

MPS は格子を用いない流体解析手法(フリーメッシュ法)の1つであり、混相界面(気液界面等)の 大変形を含む問題などに対して高い解析性能を有する。MPS では、解析体系中に分散させた多数の粒子 において物理量(速度・圧力など)を定義し、流体の基礎方程式(Navier-Stokes 方程式)を解く。その 際、粒子 *i* の位置における物理量 *o*の勾配は以下の式で計算する。

$$\left(\nabla\phi\right)_{i} = \frac{3}{n^{0}} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_{j} - \phi_{i}}{\left|\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}\right|} \left(\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}\right) w\left(\vec{r}_{j} - \vec{r}_{i}\right)\right],\tag{27}$$

ただし、n⁰は粒子密度、rは各粒子の位置ベクトル、wは粒子間距離に反比例する重み関数である。各 粒子はそれぞれの速度に応じて時間とともに移動するが、流体の非圧縮条件を満たすために粒子密度 n⁰ は一定に保たれる。

4.2 ビンガム流体モデル

背後斜面の解析を行うため、土砂を流体としてモデル化する。この際、斜面が流動化した状態にある と仮定し、ビンガム流体モデルを用いて解析を行う。ビンガム流体とは、降伏応力以下の応力では弾性 体のように振る舞い、降伏応力以上の応力においてはニュートン流体のように振る舞う流体である。し かし、流体解析において弾性体挙動を表現することは困難であるため、降伏前の状態を高粘性流体とし てモデル化し、流動速度を非常に小さくすることで不動状態に近い状態を表現する、bi-viscosity モデル ^[16]を用いて解析を実施した。bi-viscosity モデルでは、流体応力_{τi}の構成式は以下のように表される。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}}\right)\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}, \qquad \Pi \ge \Pi_c$$

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi_c}}\right)\dot{\varepsilon}_{ij}^{v}, \qquad \Pi < \Pi_c$$
(28)

ただし、Pは圧力、δijはクロネッカーのデルタ、ηは粘性係数、τ,は降伏応力である。また、Πはひずみ

速度 $\dot{\epsilon}_{ii}$ の関数であり、以下の式で計算される。

$$\prod = \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} , \qquad (29)$$

ただし、式 29 にはアインシュタインの総和規約が適用される。尚、ひずみ速度の上付き添え字は、流動時 (vp)および不動時 (v)を表す。 Π_c は流動状態と不動状態の降伏基準値であり、流動限界ひずみ速度 π_c を用いて、以下の式で表される。

$$\Pi_c = \left(2\pi_c\right)^2. \tag{30}$$

Fig. 13 に、bi-viscosity モデルの模式図を示す。bi-viscosity モデルは、フレッシュコンクリートの流動解 析などに適用されており、実験結果と良好に一致する結果が得られている^[17]。

4.3 解析用物性値の設定

本解析では、背後斜面が流動化状態にあると仮定しているため、流動化土砂の既往研究に基づいて解 析用物性値を設定する。解析対象は DEM 解析と同じく背後斜面表面の D 層であるが、流体として取扱 う際には D 層内の各層 (α , β および γ 層)における物性値の違いを表現することが困難であるため、全 て同一の物性値として取扱った。まず、密度に関しては、背後斜面の物性値から 2.14 x 10³ kg/m³ とし、 ビンガム流体モデルの降伏応力 τ_{y} は 80.0 kN/m² (地下水下の層より強度が低い地下水上の層におけるピ ーク強度を採用)とした。粘性係数についてはパラメータとし、既往研究^[18,19]の結果から水 (室温状態) の粘性係数 (1.0 x 10⁻³ Pa*s)の 10³~10⁴ 倍の値を与えることとした。Fig. 14 に、流動化状態にある土砂 の粘性係数を計測した結果^[19]を示す。

4.4 解析条件

初期の粒子分布を Fig. 15 に示す。粒子間距離(粒子径)については、1.0 m および 2.0 m として比較 検討を行った結果、両者に差が無いことを確認したため 2.0 m とした。時間刻み幅は 0.01 s であり、基準 地震動(Ss)を解析体系の底面および側面に与えて 100 秒間の解析を実施する。数値解析は、粘性係数 をパラメータとして 3 ケース実施する。それぞれのケースにおける粘性係数は、1.0 Pa*s(室温水の 10³ 倍)、5.0 Pa*s(同 5.0 x 10³ 倍)および 10 Pa*s(同 10⁴ 倍)である。 4.5 解析結果

Fig. 16 に、比較のため、地震動を与えずに解析を実施した結果(100 秒後の粒子分布)を示す(粘性 係数は 1.0 Pa*s)。bi-viscosity モデルでは完全な不動状態を模擬することができないため、地震動を与え ない場合でも粒子の移動が発生する。即ち、本解析はかなり保守側の(斜面が変形し易い)結果を導く ことが明らかである。

Fig. 17 に、粘性係数を変化させた場合の 100 秒後の粒子分布を示す。コンターは粒子移動量を表している。粘性係数 1.0 Pa*s のケース (Fig. 17(a)) では表面近傍の粒子が 60 m 程度移動しているが、土砂はコンクリート部で止まっており、粘性係数をかなり小さく設定した本ケースにおいても、背後斜面が大きく崩落することは無いと考えられる。Fig. 17(b)および Fig. 17(c)の、粘性係数をそれぞれ 5.0 Pa*s および 10 Pa*s としたケースでは、粘性係数が大きくなるにつれて土砂の移動が抑制されており、上述した保守性(地震動を与えなくても粒子が移動する)を勘案すると、背後斜面の健全性は保たれていると考えられる。

5. 結論

高速増殖原型炉「もんじゅ」背後斜面の地震時健全性評価を行うため、個別要素法(DEM)および粒子法(MPS)を用いた数値解析を実施した。

DEM 解析においては、3 軸試験の数値解析等を行うことで粒子間結合などのモデル係数を適切に設定 して解析を実施した結果、基準地震動に対して背後斜面が完全に健全性を保つことを確認した。斜面の 健全性は、粒子間結合力を弱めた場合や、地震動の振幅を5倍に増加させた場合でも保たれ、地震動を 10倍にした場合でも斜面の大規模崩落は生じなかった。

MPS 解析においては、背後斜面が流動化状態にあると仮定し、ビンガム流体モデルを用いた解析を実施した。粘性係数をパラメータとした解析の結果、流体仮定を用いているために土砂の移動を防止する ことはできなかったが、移動量は最大でも数十メートル程度であり、背後斜面が大規模崩落して原子炉 建屋等に到達することは無い、ということを確認した。

以上の解析結果から、「もんじゅ」背後斜面は基準地震動に対して十分な裕度を有していると考えら れる。

参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構, "高速増殖炉もんじゅ新耐震指針に照らした耐震安全性評価" (2009).
- [2] P. A. Cundall, "A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock systems", Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechnics, Nancy, France (1971).
- [3] P. A. Cundall, O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies", Geotechnique, Vol. 29, pp. 47-65 (1979).
- [4] P. A. Cundall, , "Formulation of a three-dimensional distinct element model -Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, pp. 107-116 (1988).
- [5] R. Hart, P. A. Cundall, J. Lemos, "Formulation of a three-dimensional distinct element model -Part II. Mechanical calculations for motions and interaction of a system composed of many polyhedral blocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 25, pp. 117-125 (1988).
- [6] S. Koshizuka, Y. Oka, "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", Nuclear Science and Engineering, Vol. 122, pp. 421-434 (1996).
- [7] 日本原子力研究開発機構,"高速増殖炉もんじゅ「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の 改定に伴う耐震安全性評価のうち 原子炉建物基礎地盤の安定性評価 屋外重要土木構造物の耐震安 全性評価 地震随伴事象に対する考慮 周辺地盤の安定性 解析物性値について"(2009).
- [8] DEM Solutions, http://www.dem-solutions.com/
- [9] H. Tochigi, Y. Ootori, T. Kawai, M. Nakajima, M. Ishimaru, "Investigation of influence factor concerned with traveling distance - Development of influence area prediction method by shaking table test of slope failure and two dimensional distinct element analysis -", Central Reserach Institute of Electric Power Industry, Civil Engineering Research Laboratory Report, No. N08084 (2009).
- [10] 北爪 貴史, 中瀬 仁, 佐藤 正行, 木津 仁史, 曽良 岡宏, 伊藤 浩二, "地盤材料の異なる斜面の地震時崩壊挙動と変位量評価の適用性に関する相違 遠心力模型振動実験, 個別要素法及び Newmark 法による検討 -", 降雨と地震に対する斜面崩壊機構と安定性評価に関するシンポジウム (2009).
- [11] A. Wakai, K. Ugai, Y. Shimizu, K. Osada, "DEM simulation for attainment distance of soil during cliff collapses", Journal of Japan Landslide Society, Vol. 40, pp. 366-375 (2004).
- [12] C. L. Tang, J. C. Hu, M. L. Lin, J. Angelier, C. Y. Lu, Y. C. Chan, H. T. Chu, "The Tsaoling landslide

triggered by the Chi-Chi earthquake, Taiwan: Insights from a discrete element simulation", Engineering Geology, Vol. 106, pp. 1-19 (2009).

- [13] R.D. Mindlin, "Compliance of Elastic Bodies in Contact", Journal of Applied Mechanics, Vol. 71, pp. 259-268 (1947).
- [14] D. O. Potyondy, P. A. Cundall, "A bonded-particle model for rock", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 1329-1364 (2004).
- [15] H. Nakase, Private communication (2009).
- [16] 山田 義智, 大城 武, "フレッシュコンクリート流動解析への MAC 法の適用", コンクリート工学年 次論文報告集, Vol. 20, pp. 131-136 (1998).
- [17] 富山 潤, 入部 綱清, 崎原 康平, 伊良波 繁雄, 山田 義智, "フレッシュコンクリートの流動解析における MPS 法の適用", 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 164-171 (2009).
- [18] 豊田 衛,山田 恭央,松島 亘志, "粘土の流動に関する数値解析的検討",第5回地盤工学会関東支 部研究発表会発表講演集, pp. 127-128 (2008).
- [19] 濱田 政則, 若松 加寿江, "液状化による地盤の水平変位の研究", 土木学会論文集, Vol. 596, pp.
 189-208 (1998).

	Donaity	Peak strength		Shoar modulus of	Deisson	
Layer	(g/cm^3)	Adhesive power (N/mm ²)	Internal friction angle (°)	rigidity (N/mm ²)	ratio	
α	2.14	0.08	43.7	210	0.36	
β	2.14	0.08	43.7	540	0.23	
γ	2.14	0.71+	1.20P	540	0.23	

 Table 1
 Physical properties of the rear slope (D-layer)

P: Compaction pressure (N/mm²)

Table 2 Physical properties for DEM simulation								
	D	Dentiale Dentiale Versee's	Vounala	Shear	Critical	Critical Stresses		
Lovor	radius	Particle	roung s	modulus	Normal	Tangential	Friction	Reflection
Layer	(m)	(kg)	10000000 $v 10^8$ (Pa)	of rigidity	direction	direction	coefficient	coefficient
	(11) ((kg) x10 (Pa)	x10 ⁸ (Pa)	x10 ⁶ (Pa)	$x10^{6}$ (Pa)			
α	0.2	269	5.71	2.10	2.30	1.50	0.5	0.1
β	0.2	269	13.3	5.40	1.90	1.15	0.5	0.1
γ	0.2	269	13.3	5.40	3.10	1.95	0.5	0.1



Fig. 1 The rear slope of "Monju".



Fig. 2 Vertical cross-section of the rear slope.



Fig. 3 Simulated region of the rear slope (D-layer).



Fig. 4 Seismic waves (Ss): (a) Vertical direction, (b) Horizontal direction.



Fig. 5 Distinct element (Voigt) modeling of particle interactions: (a) Normal direction, (b) Tangential direction, (c) Overlap of two particles.



Fig. 6 Inter-particle adhesion modeling



Fig. 7 Initial particle distribution for the DEM simulation.



Fig. 8 Particle distribution at t = 30.0 s in the DEM simulation result of Case 1 (reference case).



Fig. 9 Particle distribution at t = 30.0 s in the DEM simulation result of Case 2 (the weakened bond case).



Fig. 10 DEM simulation result of Case 3 (five times amplitude case) at t = 10.0 s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds.



Fig. 11 DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at t = 10.0 s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds.



Fig. 12 DEM simulation result of Case 4 (ten times amplitude case) at t = 30.0 s: (a) Particle distribution, (b) Distribution of the destroyed bonds.



Fig. 13 bi-viscosity model.



Fig. 14 Measured viscosity of liquefaction soil^[19].



(b)

Fig. 15 Initial particle distribution: (a) Bird's eye view, (b) Vertical cross-section.



Fig. 16 Particle distribution at t = 100 s without the earthquake.



Fig. 17 Particle distributions and displacements at t = 100 s: (a) $\mu = 1.0$ Pa*s, (b) $\mu = 5.0$ Pa*s, (c) $\mu = 10$ Pa*s.

付録1.3 軸圧縮試験解析による限界応力値設定

3.3 節に述べたとおり、DEM 解析における摩擦係数 μ 、反発係数eおよび応力限界値(σ_{max} および τ_{max})は、3軸圧縮試験の数値解析によって決定する。以下、数値解析手法の概要について記す。

3軸圧縮試験の解析体系を Fig. A1 に示す。円筒容器内の内部に、背後斜面解析に用いる粒子と等しい 半径、密度および弾性係数等を有する粒子を充填し、粒子間結合を付与して3軸圧縮試験の試料とする。 その後、以下の手順で限界主応力値を求める。

- i) 適当な摩擦係数、反発係数および限界応力値を設定する。
- ii) Fig. A2(a)に示すように、壁面圧力が目的とする圧力のになるまで、青色の領域(円筒容器壁面近傍の領域)に存在する粒子を上から圧縮する。
- iii) 壁面圧力を保ちながら、赤色の領域(円筒容器中央近傍の領域)に存在する粒子を上から圧縮する(Fig. A2(b)参照)。
- iv) 圧縮によって試料が破壊された時点において、圧縮圧力のを測定する。
- v) σ₁およびσ₃を用いてモール円を描く(Fig. A2(c)参照)。
- vi) σ₃を変化させて複数のモール円を描き、それらの包絡線(モール・クーロンの破壊包絡線)を求 める(Fig. A2(d) 参照)。
- vii) 解析結果から得られたモール・クーロンの破壊包絡線が、背後斜面の計測結果と十分に一致する まで、摩擦係数、反発係数および限界応力値を変化させて(ii)-(vi)の手順を繰り返す。

図 A2(d)は、α層について上記の3軸試験数値解析を行い、背後斜面計測結果と一致するモール・クーロンの破壊包絡線を得た際の解析結果を示している。このときのモール・クーロンの破壊包絡線は、以下の式で表される。

 $\tau = 0.08 + \sigma \tan 43.7^{\circ}$ [MPa],

(A1)

ただし、τはせん断応力、σは垂直応力である。Table A1 に、α、βおよびγの各層について3軸圧縮試験 解析を行った結果得られた、摩擦係数、反発係数および限界応力値を示す。表中には、付着部の法線方 向および接線方向の剛性も合わせて示す。解析によって得られた限界応力値から、3層の中ではβ層が最 も脆く、γ層が最も堅固であると考えられる。

Table 711 Simulation result of thatfair compression tests						
	Normal	Tan contial	Critica	l Stresses		
Lavan	normal	Tangential	Normal	Tangential	Friction	Reflection
Layer	$10^9 (N/m^3)$	$x 10^8 (N/m^3)$	direction	direction	coefficient	coefficient
	x10 (IN/III)	X10 (IN/III)	x10 ⁶ (Pa)	x10 ⁶ (Pa)		
α	1.43	5.71	2.30	1.50	0.5	0.1
β	1.43	5.71	1.90	1.15	0.5	0.1
γ	1.43	5.71	3.10	1.95	0.5	0.1

Table A1 Simulation result of triaxial compression tests



Fig. A1 Simulation domain of triaxial compression tests: (a) Cylindrical container, (b) Vertical cross-section and particle distribution (test sample).



Fig. A2 Simulation procedure of triaxial compression tests: (a) Compression of the wall region to achieve the wall pressure of σ_3 , (b) Compression of the central region, (c) Mohr's stress circle, (d) Mohr-Coulomb equation.



付録 2. DEM 解析における初期状態の作成手法

粒子間付着力を考慮した DEM 解析では、初期の粒子(分布)状態が適切に設定されていない場合、 解析開始直後に過大な応力が発生し、土砂が崩壊するという現象が起こり得る。このため、本研究では 以下の手順に基づいて適切な初期状態を作成する。

- i) Fig. A3(a)に示す通り、α、β、γの各層境界に仕切りを作成し、また、D 層上部(斜面表面)にカ バーを作成することで、α、β、γの各層粒子が充填される部分領域が確保される。
- ii) Fig. A3(b)に示すように、仕切りおよびカバーで区切られた各部分領域に、それぞれ対応する粒子 を充填する。この際、体系奥行き方向に重力を発生させ、自由落下によって粒子を堆積させる。
- iii) 各部分領域において、手前側の壁面を奥に向かって移動させ、粒子を圧縮する(Fig. A3(c)参照)。
- vi) α、β、γ各層境界の仕切りを削除する。その際、下向き(本来の向き)に重力を作用させることで、 各層の粒子がわずかに下向き移動し、各層間の隙間が埋まる(Fig. A3(d)参照)。
- v) 近接する粒子間に結合を与え、初期状態とし、D層上部のカバーを削除する。

Fig. A3 に示す通り、本手法によって適切な初期状態を形成することが可能である。ただし、付着力を弱めたケースにおいては、D層上部のカバーを削除した際に、表面近傍の粒子がわずかに移動するという現象が確認されている。



Fig. A3 Build process of the initial particle distribution: (a) Inter-layer partitions and a surface cover, (b) Particle filling, (c) Compression of particle layers, (d) Deletion of the partitions.

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本ì	単位		
巫平里	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	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	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					
_{知 고 문} SI 基本	5単位				
和立重 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 さ , 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	$- \vdash \nu = kg/m^2$				
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・	$- h \mu A/m^2$				
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	$\nu mol/m^3$				
質量濃度 キログラム毎立法メ	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	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	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) これらは電気元量あるいは次元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

	SI 組立単位			
組立量	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 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 協 方 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力, 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	С		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	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
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,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		2.		
酸素活性	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

(a)SE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、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を種の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(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

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝 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
酵素活性濃度	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}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

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	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される数値が美敏的に待られるもの					
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=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					
	名称記一			SI 単位で表される数値	
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa	
水銀柱ミリメートルmmHg				1mmHg=133.322Pa	
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m	
海		里	М	1 M=1852m	
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²	
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネ	-	パ	Np	ar送佐1	
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.	
デ	ジベ	N	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			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ^{-2} 10 ⁴ lx			
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (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				記号	SI 単位で表される数値	
+	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
ν	ン	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
ν				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I.		ル	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メ	ートル	/系	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ			IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	ン	μ	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$

この印刷物は再生紙を使用しています