

#### 地層処分研究開発の一端に触れて 一地下環境のおもしろさ -

東京慈恵会医科大学訪問研究員 元日本原子力研究開発機構研究主席

吉川英樹

プロファイル

- 昭和62年東京都立大学大学院理学研究科化学専攻 核放射化学博士課程単位取得退学
- 大学院の時の研究

220Rn, 222Rn and 14C in Volcanic Gases(理学博) 加速器質量分析法で6万年前の試料調製開発

- 大学助手の時の研究
  地球化学、噴火予知Rn調査、<sup>14</sup>C測定、港川人人骨年代測定等
- 日本原子力研究開発機構での研究
  地層処分研究としての核種移行研究、ナチュラルアナログ研究
  (考古学試料のX線CT分析等による金属腐食評価)など
- 東京慈恵会医科大学での研究
  福島第一原子力発電所事故後の環境中での放射性物質移行

#### 我が国の放射性廃棄物の区分と処分方法



https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\_and\_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html#h01 <sup>3</sup>

#### 我が国の放射性廃棄物の区分と処分方法 2



トレンチ処分の例 日本原子力研究開発機構 廃棄物埋設実地試験



ピット処分の例 日本原燃(株)低レベル放射性廃棄物埋設センター



中深度処分の案 第2回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討 チーム会合(平成27年2月12日)

4

https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\_and\_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html

#### 地層処分の安全性評価をどのように知るか

処分場からの放射性核種の漏洩を評価する(地下水シナリオ、多重バリアシステム)。



ガラス固化体:ガラスにして安定化 オーバーパック:ガラス固化体を厚さ19cmの金属製の容器 で密封。少なくとも1000年間、地下水との接触を遮断。 その間、ガラス固化体の放射能は99.9%以上が減少。 緩衝材(ベントナイト):オーバーパックと岩盤の間に、 緩衝材として特殊な粘土を厚さ70cm程度に敷き詰め。

地下水の止水効果、漏洩した放射性元素の吸着を期待。

#### オーバーパック:H12 specific (JNC,2000)

高さ: 173 cm 直径: 82 cm (肉厚:19 cm) 4 cm: 腐食しろ(3.18cm/1000y) 15 cm: 放射線遮蔽としての厚さ

地下環境で金属がどのくらい持つか?

#### 深部地下水の組成について





実験室での腐食実験の例

オーバーパックの材料である炭素鋼の長期にわたる腐食速度を求める実験

十年間実験した炭 素鋼の試験片

ベントナイト中での腐食試験



From:Taniguchi(2004): Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop, Nice, September 2004, p24-34

#### 深部地下水の組成について



#### 遺跡で見られる酸素の多い環境(酸化性)と少 ない環境(還元性)の状況



#### 弱酸化性から還元性環境



試料2-1(鉄帯)



#### 国内で鉄製、銅製の遺物がどの位発見されているか



#### 我が国で出土する金属製遺物の年代



## これまで調査してきた鉄製遺物の産出地点



#### 実験では求められない長期の現象を理解するため には何ができるのか? 自然界の類似現象理解より

- 欲しいデータ
  - ー長期の腐食量(腐食量、腐食速度、錆の密度、錆の化学組成、母材の組成) ーどのような腐食環境かのパラメータ
    - (酸素濃度、水分量、塩分量、土壤電位、酸化還元電位、微生物量、腐食期間)
- 試料
  - 一鉄製遺物(土壤中、密封空間中、海中)、
  - -青銅や銅製遺物(土壌中、密封空間中、海中)
  - 一土壤、地下水、年代測定試料
- 分析方法
  - -機器分析(XRD、X-CT、SEM)、化学分析(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Fe<sup>2+3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、 土壤電位、
  - 一微生物分析(SRB、IRB、IOB)、
  - 一年代測定(AMS)





#### 酸化還元電位の測定



## 鉄製遺物の周辺にどのような微生物がいたか



No.	Most Probable Number (MPN method) (cell/g)				
	好酸化細菌	鉄酸化細菌	鉄還元菌	硫酸還元菌	
01	7.0 x 10 <sup>8</sup>	N.D.	1.2 x 10 <sup>4</sup>	3.4 x 10 <sup>3</sup>	
02	2.2 x 10 <sup>9</sup>	N.D.	2.3 x 10 <sup>4</sup>	1.5 x 10 <sup>3</sup>	
03	4.9 x 10 <sup>8</sup>	N.D.	9.0 x 10 <sup>2</sup>	6.0 x 10	
04	7.9 x 10 <sup>8</sup>	N.D.	2.2 x 10 <sup>4</sup>	7.3 x 10 <sup>3</sup>	

#### 出土鉄製遺物の分析例 携帯式 X-ray 回折装置と蛍光X線分析装置



X-RD の分析結果から主に非晶質の錆層を検出。錆の結晶質部分はgoethite (α-FeOOH), magnetite (Fe3O4), lepidocrocite (γ-FeOOH), と akaganeite (β-FeOOH) だった。

#### 加速器質量分析装置(AMS) 2.5018 MV 01-1 04-1 Sample size : a few mg-C T *s*<sup>1-2</sup> Dating : modern ~ -60000 y \$1-1 Error : ±0.5 % 14-1 Measuring time : 20 m $\sim$ 120 m

#### JAEA Tono Geoscience Center AMS



18

个 L4-2





医療用X線CT装置



工業用マイクロX線CT装置



#### 工業用高出力X線CT装置

#### 工業用X線CT装置(高出力)







#### 鉄製遺物(鉄帯、釘)のX-CT測定例



遺物表面:茶褐色の錆層で被覆 (高い酸化雰囲気と推定) 母材の状況:鉄が少し残存又は消滅 錆の密度:低い 錆厚:0.7-5.7 mm



Density distribution obtained by X-ray CT





計判2-2(4井)

X線CTデータから推定され る内部構造









出土した鉄製鍬は周囲の土壤 事ポリエチレン樹脂でバックし 取り出し、そのままX-CTで内部 構造を測定した。









長さ : 約 300 mm, 幅 : 約 100 mm

2006年に鉄製鍬が田から出土

## X-ray CT 撮像の結果





#### 周囲の土<mark>壌ごと採取し、医療用X線CTで測定</mark>





医療用X-ray CT (Toshiba co.)







出土したチョウナ(釿、手斧) 長さ:約12cm、幅:約7.5cm

# チョウナ(釿、手斧)について



奈良の寺院におけるチョウナ を使った儀式

#### 清水建設所蔵の儀式用大工道具

#### 鉄製遺物、手斧の出土例 島根県、出雲大社境内遺跡, (13<sup>th</sup> C)



粘土質土壌から発掘された鉄製手斧

長さ: 約 120mm 幅 : 約 75 mm

─埋設期間:約750 年間 (AMS dating 1228)、発掘年月 2000年12月 調査資料:鉄製遺物

釿(手斧、チョウナ) 2点、鉄帯 3点、鉄製釘 5点 発掘状況:周囲が粘土質土壌に覆われた還元環境 (2釿について)





鉄製遺物のチョウナはこの木製の柱の下から発掘

「出雲大社境内遺跡」大社町教育委員会2004より

(1m 直径の柱 を3本鉄製帯で くくった柱)

30





表面の様子:黒色錆 (低酸素条件) 母材の様子:鉄残存 錆:高密度 錆厚:0.2-0.67 mm 腐食速度:(0.26-0.89) x10<sup>-3</sup> mm/y 分析方法: X-ray computed tomography



#### 参考:鉄帯のようす 出雲大社境内遺跡, (13<sup>th</sup> C) Bタイプ 二層腐食











44





## 鉄製遺物、甲冑

#### 宮崎県、六野原古墳, (4-7c) 古墳時代



試料寸法:幅約130mm 厚さ約2mm 表面状態:黒色錆(低酸素環境) X線回折結果:マグネタイト 腐食状況:

(錆厚<約 0.2mm) (孔食腐食 = 約 2.0 mm)

## 鉄製遺物、鉄てい 奈良県、大和六号墳, (4-7c) 古墳時代

#### 1945年に米軍基地建設の ため取り壊される



#### 鉄てい 872 枚出土,

- 大型 (272 枚): 400x70(130)x3 mm, 250-700 g - 小型 (590 枚): 150x20(30)x3 mm, 20-30 g 貢物 埋蔵期間:1500-1600年間
- 朝鮮より鉄原材料として輸入説 鉄製斧 281 枚, 鉄製鍬 138 枚, 鉄製小刀 284 個



<sup>大和6号墳跡</sup>幅:129.5 m 「宇和奈辺古墳」長さ:205 m 高さ:19.8 m



陪ちょう



#### 表面処理未処理

- 発掘当初の姿?
- やや黒味の茶褐色の錆
- X-CT, XRD測定実施



#### **断面** - 中心部に金属光沢を有する











 1:1mmの深さの孔食腐 食を確認 (A-A')
 2:2-4 mm の厚さの鉄 板の周りを約 0.5 mm の錆が覆う (B-B')

37

#### 鉄製遺物の腐食状況の分類(4 types)

13の遺跡から出土した約40点の試料について、X線-CT測定結果より分類した

総腐食量(I): I=(diρinnerKinner/σ) inner + (doρouterKouter/σ) outer

> d:錆びの厚さ(mm) ρ:錆の密度(g/cm<sup>3</sup>、内3.8、外1.8) k:錆の鉄含有率(内0.7、外0.5) σ:鉄密度(7.9g/cm<sup>3</sup>)

## 鉄製遺物の腐食状況の分類(4 types)

- A) 完全腐食 complete corrosion:酸素存在雰囲気での腐食進行 錆の厚さから腐食速度の値を最小の参考値として評価
- B) **二層腐食 two layer corrosion**: マグネタイトの錆とゲーサイトの錆の存在 腐食環境が変化したか、酸素拡散が律速である環境での腐食と推測

試料No.	形状	試料厚さと錆	厚 (mm)	総腐食量 (mm)	腐食速度	腐食状態
(Izumo)		Inner layer	Outer layer	(11111)	(mm/y)	
2-1	鉄帯	2、0.67	50、5.7	6.3	>8.6x10 <sup>-3</sup>	complete
2-3	鉄帯	4、1.3	20、2.2	3.5	4.7x10 <sup>-3</sup>	remaining iron
2-4	釘	10、3.3	15、1.7	5.0	6.8x10 <sup>-3</sup>	remaining iron
2-5	釘	2、0.67	20、2.2	2.8	>3.8x10 <sup>-3</sup>	complete
2-7	釘	2、0.67	30、3.4	4.0	>5.4x10 <sup>-3</sup>	complete

## 鉄製遺物の腐食状況の分類(4 types)

- C) 一層腐食 one layer corrosion: 母材の鉄が残存、一層の錆層で被覆
  (e.g. magnetite, siderite...) 低いまたは大気酸素濃度環境下で全面腐食
  general corrosionが進行したと推測。
- D) 一層腐食と孔食腐食 one layer and pitting corrosion: 鉄母材がほぼ残存, 初期の大気酸素濃度環境下での腐食時に孔食腐食が発生し、その後比較 的低い酸素濃度環境下で全面腐食となったと推測。(e.g. magnetite, siderite...)

試料 No.	形状	試料厚さと錆厚 (mm)		総腐食量	腐食速度	腐食状態	
		Inner layer	Outer layer	(mm)	(mm/y)		
Izumo-1	手斧	0.3~0.6、 0.1~0.2	ND	0.2	0.3x10 <sup>-3</sup>	general, remaining iron	C
Izumo-2	手斧	2、0.67	ND	0.67	0.9x10 <sup>-3</sup>	general, remaining iron	C
Rokunohara	甲冑	0.5、0.2	ND	2.2	1.5x10 <sup>-3</sup>	pitting and general	D

腐食実験と鉄製遺物から求めた腐食データの比較 I



Taniguchi(2004): Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop, Nice, September 2004, p24-34



まとめ

- 13の遺跡から出土した約40の鉄製遺物の錆厚をX線-CTで 分析しその腐食形態から4つのグループに分けた。
- Type A:酸素濃度が高いか鉄遺物の厚さが薄いために鉄
  母材が残っていなく完全に腐食した試料。参考値として利用。
- Type B : 二層の錆層が存在、 e.g. siderite-goethite, magnetite-lepidcrocite.
- Type C : 一層の錆層が存在 siderite or magnetite
- Type D: 全面腐食と孔食腐食を確認。腐食環境が変化した 可能性がある。
- Type C の一部と D は弱酸素濃度または還元性環境下で腐 食したと考えられ、その腐食量は1000年間で 0.1 – 1.0 mm である。
- 現在考えられている1000年後のオーバーパック腐食量(31.8 mm)は約1桁高い腐食量と鉄遺物から推測される。
  - 考古学資料は長期の廃棄物容器の腐食評価に有効な情報 をもたらす。

## 主な関連文献リスト

表題	著者	発表先
Input of iron corrosion studies to the Japanese safety case- Corroborative evidence by using iron-based archaeological artifacts to long term stability of the overpack-	H.Yoshikawa	The 13th Natural Analogue Working Group Workshop Nagoya (Japan), 2013
Biomineralization of Vivianite on Carbon Steel Surface Attacked by the Iron Reducing Bacteria	S.Lee, H.Yoshikawa and T.Matsui	2010 MRS Spring Meeting San Francisco(USA), MRS- Symposium Proceedings vol.1265, AA06-01, pp.209-214, 2010
いわき市鉄刀調査について	吉川英樹	いわき埋蔵文化財調査報告 第141冊 神谷作106号 墳白穴横穴群、2010
A Sampling Method and Data Evaluation of Archaeological Samples to Support Long- Term Corrosion Prediction	H.Yoshikawa, S.Lee and T.Matsui	Corrosion The journal of Science and Engineering, 65(4), pp.227-232, 2009
大型鉄遺物のX線CT測定法の比較	林真紀、吉川英樹	日本原子力研究開発機構研究開発報告書、JAEA- Research 2018-024、2008
遺跡が語る地下の世界	吉川英樹	原子力 eye、vol54(3)、pp.10-11、2008
Application of archaeological analogues for a repository safety case : arguments supporting the waste container lifetime	H.Yoshikawa, K.Ueno and M.Yui	Safety Cased for the Deep Disposal of Radioactive Waste : Where Do We Stand ?, Paris(France), OECD-NEA report No.6319, pp.365-371, 2008
宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳出土鉄て いの腐食調査	吉川英樹、本田卓、郡司英一	日本原子力研究開発機構研究開発報告書、JNC- TN8400 2005-031、2005
X線CTによる鉄器の非破壊評価	本田卓、山口新吾、吉川英樹、上野健一、 油井三和	「出雲大社境内遺跡」第21章、pp.413-430、2004



# 聴講ありがとうございました。

謝辞:本研究を実施するにあたり下記の機関の研究者にご協力いただきました。 宮内省書陵部、筑波大学、出雲大社、出雲市教育委員会、つくば市教育委員会、 日立製作所、東芝ITコントロールシステム、青森県埋蔵文化財調査センター、 日本原子力研究開発機構

吉川英樹







大きさ:総高21.7cm,最大幅13.5cm,重量560.9g 埋蔵期間(推定):1800±100 年

# 本試料の特徴と分かったこと

•場所:茨城県つくば市小田城遺跡(13世紀~17世紀) 調査出土物:池跡から鉄製鍬が出土 埋蔵推定年数:700-300 年間 発掘日:2006年12月 埋蔵環境:酸化性環境(推定) 分析項目:非破壞分析···X線CT測定 その他分析・・・・土壤分析(化学成分、

微生物)

• 1000年間あたりの鉄の錆びた量: 1.5 mm

【調査方法】

・鉄遺物の腐食診断、鉄還元細菌数(MPN法、Most Probable Number) <u>MPN法(Most Probable Number, 希釈法)</u>

:遺跡土壌の連続希釈液を液体培地に接種培養して『陽性』となった

試験管数の出現率から、元の土壌中の鉄還元細菌数を算出する。

鉄還元の判定(ジピリジル法)

:液体培地に 0.2% α α' - ジピリジルを滴下し、培地が赤く 変色したものを鉄還元陽性と判断する。







# Site investigation for environment of soil

Polarization resistance method (portable corrosion rate measurement, Rohrback Cosasco Systems, Corrater® Aquamate):

corrosion rate of original metal without rust layer using a carbon steel (P/N 850-K03005)



in soil : 0.169~0.173mm/y Measuremer in groundwater : 0.047~0.050mm/y from iron-based artifacts : 0.0006~0.002mm/y (X-CT data)

Measurement of soil potential

The 13<sup>th</sup> Natural Analogue Working Group Workshop, 13<sup>th</sup>-16<sup>th</sup> May, 2013, Nagoya, Japan







錆:茶褐色

52

		錆の組成(X線回折法)			
試料 番号	型	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> magnetite 磁鉄鉱	alpha- FeOOH goethite 針鉄鋼	gamma- FeOOH lepido- crosite	beta- FeOOH Akaganeite 赤鉄鋼
232	大型	++	++	+	+

=	语	化学組成			
試料 番号		Fe	Р	Cu	Ti
232	大型	60.1	<0.01	0.09	<0.01

試料:鉄てい、分析方法:XRD, ICP-AES, Absorption method



表題	著者	発表先
境矢石遺跡出土鉄器の非破壊分析	三ツ井誠一郎	一般財団法人米子市文化財団埋蔵文化報告 書6 一般国道180号(南部バイパス)道路改良 工事に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書V 鳥 取県西伯郡南部町境矢石遺跡 第2分冊 pp.35-48, 2015
鳥取市良田中道遺跡出土袋状鉄斧の埋蔵 環境と腐食	三ツ井誠一郎	公益財団法人鳥取県教育文化財団編 2014 「良田中道遺跡」鳥取県教育委員会 pp。221 -230、2015
妻木晩田遺跡出土鉄器の埋蔵環境と腐食	三ツ井誠一郎	妻木晩田遺跡発掘っ調査研究年報 2014、 pp.27-44。2015
本高弓ノ木遺跡出土鉄器の非破壊分析	三ツ井誠一郎	ー般国道9号(鳥取西道路)の改築に伴う埋蔵 文化財発掘調査報告書で「本高弓ノ木遺跡(5 区) I 」、pp.241-258、2013
Input of iron corrosion studies to the Japanese safety case- Corroborative evidence by using iron-based archaeological artifacts to long term stability of the overpack-	H.Yoshikawa	The 13 <sup>th</sup> Natural Analogue Working Group Workshop Nagoya (Japan), 2013
大阪府八尾市大竹西遺跡出土鉄剣の非破 壊分析	三ツ井誠一郎	平成24年度 八尾市歴史民俗資料館報·研究 紀要 第24号、pp.73-80、2013
青銅器の埋蔵環境について	三ツ井誠一郎	平成23年度千曲川替佐・柳沢築堤事業に伴う 埋蔵文化財発掘調査報告書一柳沢遺跡一、 pp.139-146、2012

表題	著者	発表先
Long-Term Corrosion of 2,000-Year-Old Ancient Iron Sword	S.Mitsui, A.Fujii, M.Higuchi and K.Nishiimura	MRS 2011 35 <sup>th</sup> International Symposium on Scientific Basis for Nuclear Waste Management Buenos Aires (Argentina) MRS symposium proceedings vol. 1475, pp.545- 550, 2011
いわき市鉄刀調査について	吉川英樹	いわき埋蔵文化財調査報告 第141冊 神谷 作106号墳白穴横穴群、2010
Biomineralization of Vivianite on Carbon Steel Surface Attacked by the Iron Reducing Bacteria	S.Lee, H.Yoshikawa and T.Matsui	2010 MRS Spring Meeting San Francisco(USA), MRS- Symposium Proceedings vol.1265, AA06-01, pp.209-214, 2010
A Sampling Method and Data Evaluation of Archaeological Samples to Support Long-Term Corrosion Prediction	H.Yoshikawa, S.Lee and T.Matsui	Corrosion The journal of Science and Engineering, 65(4), pp.227-232, 2009
大型鉄遺物のX線CT測定法の比較	林真紀、吉川英樹	日本原子力研究開発機構 研究開発報告書、 JAEA-Research 2018-024、2008
遺跡が語る地下の世界	吉川英樹	原子力 eye、vol54(3)、pp.10-11、2008
Application of archaeological analogues for a repository safety case : arguments supporting the waste container lifetime	H.Yoshikawa, K.Ueno and M.Yui	Safety Cased for the Deep Disposal of Radioactive Waste : Where Do We Stand ?, Paris(France), OECD-NEA report No.6319, pp.365-371, 2008
宇和奈辺陵墓参考地陪塚大和六号墳出土 鉄ていの腐食調査	吉川英樹、本田卓、郡司英一	日本原子力研究開発機構 研究開発報告書、 JNC-TN8400 2005-031、2005

表題	著者	発表先
鉄遺物のX線CT測定	本田卓、郡司英一	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2004-030、2005
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅳ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2003-059、2004
X線CTによる鉄器の非破壊評価	本田卓、山口新吾、吉川英樹、上野健 一、油井三和	「出雲大社境内遺跡」第21章、pp.413-430、 2004
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅲ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2003-012、2003
X-ray CT Analysis of Iron-based Archaeological Remains Buried inSoil	T.Honda, S.Yamaguchi, H.Yoshikawa, K.Ueno and M.Yui	13th Asian-Pacific Corrosion Contral Conference (APCCC-13), Suita(Japan), APCCC-13 Abstgracts C204, Proceedings Paper No.C-01, 2003
Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using Xray-CT	H.Yoshikawa, K.Ueno, T.Honda, S.Yamaguchi and M.Yui	9 <sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'03) Oxford (England), Proceedings of ICEM2003-4776, pp.939-946, 2003
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅱ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2001-045、2002
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2000-007、2001
X線CTによる鉄製考古遺物の非破壊調査 鉄の腐食性を考古遺物で検証する	山口新吾、本田卓	検査技術 2000年10月号、pp.1-4、2000

表題	著者	発表先
鉄遺物のX線CT測定	本田卓、郡司英一	日本原子力研究開発機構 研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2004-030、2005
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅳ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2003-059、2004
X線CTによる鉄器の非破壊評価	本田卓、山口新吾、吉川英樹、上野健 一、油井三和	「出雲大社境内遺跡」第21章、pp.413-430、 2004
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅲ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2003-012、2003
X-ray CT Analysis of Iron-based Archaeological Remains Buried inSoil	T.Honda, S.Yamaguchi, H.Yoshikawa, K.Ueno and M.Yui	13th Asian-Pacific Corrosion Contral Conference (APCCC-13), Suita(Japan), APCCC-13 Abstgracts C204, Proceedings Paper No.C-01, 2003
Analysis of the Excavated Archaeological Iron Using Xray-CT	H.Yoshikawa, K.Ueno, T.Honda, S.Yamaguchi and M.Yui	9 <sup>th</sup> International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM'03) Oxford (England), Proceedings of ICEM2003-4776, pp.939-946, 2003
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査(Ⅱ)	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2001-045、2002
土壌中の考古学的金属製品の腐食に関す る調査	本田卓、山口新吾	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、2000-007、2001
X線CTによる鉄製考古遺物の非破壊調査 鉄の腐食性を考古遺物で検証する	山口新吾、本田卓	検査技術 2000年10月号、pp.1-4、2000

表題	著者	発表先
考古学的金属材料を用いたナチュラルアナ ログ研究(皿)	永井巌、松田史朗、庄司一雄、佐光武 文、白石佳代、渡部邦夫	日本原子力研究開発機構研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、99-045、1999
土壌埋設鋼材の長期腐食挙動に関する研 究(XI)	炭山守男	日本原子力研究開発機構 研究開発報告書類、 JNC-TJ8400、99-042、1999
人エバリア材の耐久性を示す天然類似現 象	亀井玄人	電気評論、199年9月号、pp.34-39、1999
X線CTによる鉄製考古遺物の非破壊調査	山口新吾、本田卓、三ツ井誠一郎、松田 政基、折原洋一	第3回放射線による非破壊評価シンポジウム 講演論文集、pp.75-80、1999