

# SALT & SEAWATER SCIENCE SEMINAR 2012

財団法人 塩事業センター 海水総合研究所

**元素の世界から眺める海水の科学**

2012年12月7日(金) 13:00 ~ 16:00

## 講演

### 1. 宇宙と元素の創生、太陽系・地球・海の誕生

財団法人塩事業センター 海水総合研究所 所長 長谷川 正巳

### 2. 海水を構成する元素、その特徴と分離方法

財団法人塩事業センター 海水総合研究所 主任研究員 正岡 功士

### 3. 元素から見た放射能 Q & A

財団法人塩事業センター 海水総合研究所 主任研究員 野田 寧

## 協賛

公益財団法人 ソルト・サイエンス研究財団、日本海水学会、公益社団法人 化学工学会、  
分離技術会、日本イオン交換学会、日本膜学会、日本海洋学会、公益社団法人 日本分析化学会



財団法人 塩事業センター  
海水総合研究所

# Salt & Seawater Science Seminar 2012

元素の世界から眺める海水の科学

## — 講演プログラム —

2012年12月7日(金) (受付 12:00~)

13:00 開会

13:00~13:10 挨拶 財団法人塩事業センター 理事長 柘植 秀樹

13:10~16:00 講演

ページ

### 講演 1

**宇宙と元素の創生、太陽系・地球・海の誕生** ..... 1

財団法人塩事業センター 海水総合研究所

所長 長谷川 正巳

### 講演 2

**海水を構成する元素、その特徴と分離方法** ..... 11

財団法人塩事業センター 海水総合研究所

主任研究員 正岡 功士

---

休憩

コーヒーブレイク

### 講演 3

**元素から見た放射能 Q&A** ..... 25

財団法人塩事業センター 海水総合研究所

主任研究員 野田 寧

閉会

Salt and Seawater Science Seminar 2012

# 元素の世界から眺める海水の科学



## 宇宙と元素の創生、太陽系・地球・海の誕生

### 話題

- ① 宇宙と元素の創生
- ② 太陽系の誕生
- ③ 地球の誕生
- ④ 海の誕生

海水総合研究所  
長谷川正巳

2

## Prologue

元素＝物質を構成している原子レベルでの基本成分であり、原子の種類を表す。  
…水は酸素(という元素)と水素(という元素)からなる。

原子＝物質を構成する基本的な粒子であり、正電荷を持つ原子核と核外をまわる負電荷を持つ電子からなる。…水は水素原子2個と酸素原子1個からなる。

原子核＝陽子と中性子で構成され、その重さは陽子≒中性子

質量数＝陽子の数＋中性子の数

原子量＝ $^{12}\text{C}$ (陽子=6、中性子=6)の原子量を12として基準

周期律表をみると、 $\text{C}=12.0107$

同位体＝同じ元素でも中性子の数の違う原子がある。

例えば、 $^{12}\text{C}$ (98.93%)、 $^{13}\text{C}$ (1.07%)

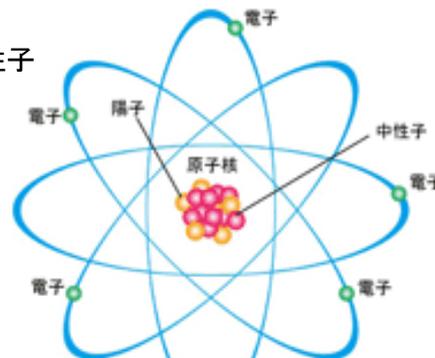
中性子6個と7個の違い

$$12 \times 0.9893 + 13 \times 0.0107 = 12.0107$$

安定同位体＝ $^1\text{H}$ (水素:陽子1個、中性子0個)

$^2\text{H}$ (重水素:陽子1個、中性子1個)

放射性同位体＝ $^3\text{H}$ (三重水素:陽子1個、中性子2個)・・・1個の中性子から電子を放出して陽子となり、 $^3\text{He}$ (ヘリウム:陽子2個、中性子1個)ができる。





## 宇宙と元素の創生・・・「無」から「有」を生んだビッグバン



3

### 宇宙に始まりはあるか？

- 全く自明ではない基本的な問いかけ
- 始まりがあるとすると
  - なぜ始まったのかと聞きたくなる
  - その前は何だったのかと聞きたくなる
- 「神様なしで」このような禅問答を避けるには、
  - 始まりも終わりもなくずっと同じ状態のまま
  - 無限に輪廻転生を繰り返す
 のどちらかだと考えたほうがずっとすっきりする
- つまり、**哲学的・宗教的には「宇宙に始まりはない」あるいは「創造主がいる」ことにしないと面倒**
- しかし、**科学的には「始まりはある」とされる**

東京大学大学院理学系研究科 須藤 靖先生 講演資料より

私の中では、宇宙をつくった創造主は必ずいると信じている。宇宙・元素の創生、太陽系・地球・海の誕生、すべてに奇跡があり、我々の地球が成り立っていると思うからだ。

### 137億年前に起こったビッグバン(宇宙の創生)後の宇宙の変化(時系列)

経過時間	出来事	内容	温度
10 <sup>-34</sup> 秒後	素粒子の飛び交う世界	陽子や中性子の素であるクォークやレプトンである電子やニュートリノ、光の粒子が超高温の世界で飛び交う	10 <sup>28</sup> °C
1/10万 秒後	陽子・中性子が生まれる	クォーク[(u),(d)]が結合し陽子と中性子が生まれる	1兆°C
3分後	原子核のみが生まれる	陽子と中性子が結合して、初めて原子核が生まれる	10億°C
30万年後	原子が生まれる[宇宙の晴れ上がり]	自由に飛び交っていた電子が原子核にとらえられ、水素・ヘリウムが生まれる。電子によって阻まれていた光の直進が可能となり、光がさし始める	4,000°C
10億年後	最初の銀河が生まれる	銀河には数多くの恒星が重力により誕生する	現在は-270°C

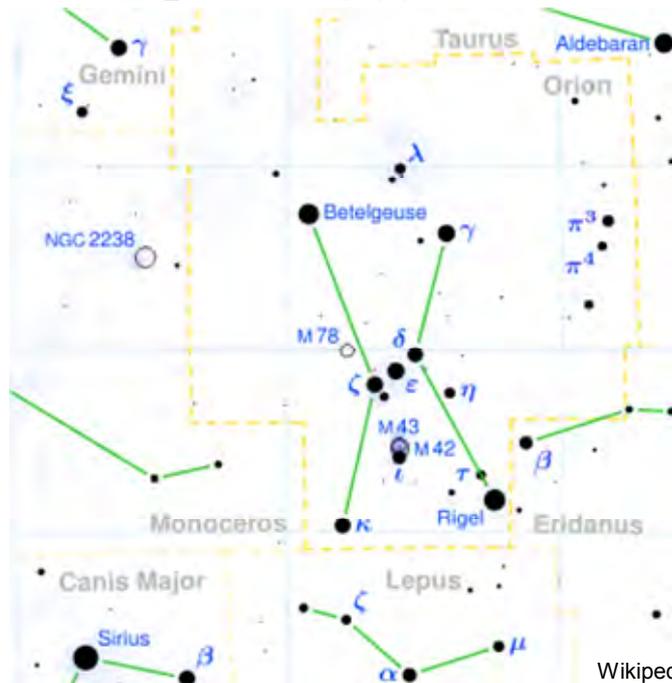


## 宇宙と元素の創生・・・夜空を眺めてみると

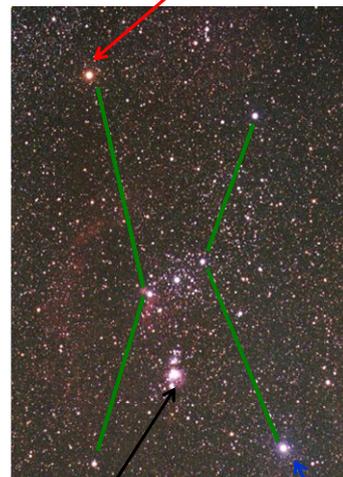


4

オリオン座を眺めてみよう。



ベテルギウス(赤の一等星)



オリオン座大星雲

リゲル(青の一等星)

Wikipedia より

## 宇宙と元素の創生・・・恒星の質量と表面温度との関係

The Salt Industry Center of Japan  
Research Institute of Salt and Sea Water Science

5

- ・恒星は「主系列星」「赤色巨星」「白色わい星」に分類できる。赤色巨星は年寄りの星。
- ・恒星の色は表面温度で決まる。青い星が温度が高い星で、白、黄色、オレンジ色と温度が低い星になり、赤い星は特に温度が低い星(それでも3,000度位)である。
- ・星の明るさと表面温度の関係をあらわしたものがHR(ヘルツシュプリング・ラッセル)図。縦軸は恒星が出す光の強さ、横軸は温度。大部分の恒星は左上から右下へほぼ一列に並ぶ。このグループの恒星が主系列星を示す
- ・HR図の横軸は表面温度にすることも、色にすることもある。我々の太陽は、HR図上では主系列のほぼ中央。

ヘルツシュプリング・ラッセル(HR)図

科学技術振興機構 理科ネットワークより

## 宇宙と元素の創生・・・恒星の質量と表面温度、寿命との関係

The Salt Industry Center of Japan  
Research Institute of Salt and Sea Water Science

6

- ・中心部で核反応が続く間、恒星は安定して輝き続け、質量の大きい星は核反応がさかんなため明るく輝き、また表面温度が高くなる。
- ・リゲルのような恒星(太陽質量の約20倍)の寿命は500万年、我々の太陽の寿命は100億年と質量が大きな恒星ほど、指数的に寿命が減少する。
- ・因みに太陽の年齢は46億年。人間でいうと中年か。寿命は半分ほど残されているが、いずれ金星の公転軌道ほどまで膨張すると考えられている。
- ・リゲルの末路は超新星爆発後に中性子星、太陽は白色矮星だと考えられている。

科学技術振興機構 理科ネットワークより

太陽質量	表面温度(K)	寿命
100 (倍)	52,000	500万年
50	44,000	650万年
10	24,000	2,900万年
2	9,200	2,900万年
1	5,400	100億年
0.5	3,800	1,800億年

[星の寿命(τ)と質量の関係]  
 $\tau \propto 1 / (\text{星の質量})^{2.5}$

白色矮星(シリウスの伴星)  
 赤色巨星の外層部が剥がれ、核のみとなっている。余熱が残るが、いずれは黒色矮星に。  
 半径は地球と同じ、質量は太陽と同じ。

ベラ・パルサー  
中心部に中性子星がある。  
半径10km程度で、太陽と同じ質量を持つ。



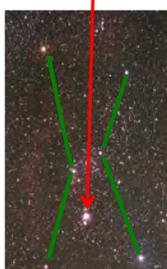
## 宇宙と元素の創生・・・2012年宇宙の旅


7



オリオン大星雲(散光星雲)

肉眼でも見える星雲。真ん中の明るい部分は、1万年前に生まれた「トラペジウム」と呼ばれる新しい恒星。



青い星(若者)の集団

おうし座の散開星団。プレアデス星団(通称: 昴(すばる))。雲のように見えるのは星間ガス。誕生後、約6千万～1億年。



Wikipedia より

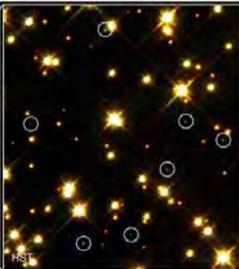


赤い星(年寄りの集団)

さそり座の球状星団M80。互いに、重力によって拘束されるため、球状に集まる。誕生が100億年前のものも。星の誕生も確認されている。



Ground



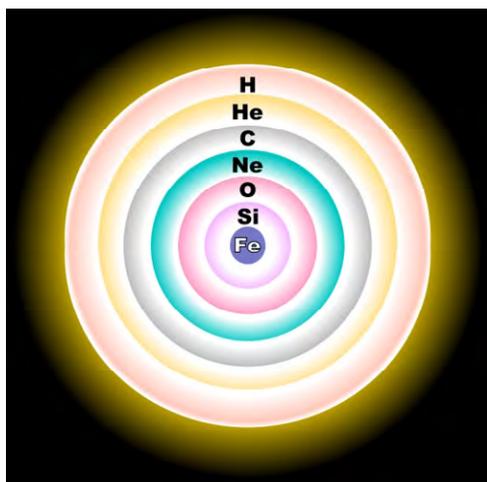
Fe

さそり座の球状星団M4。  
 ○で囲まれた星はすべて白色矮星。星間ガスがなければ、星の墓場となる。



## 太陽系の誕生・・・それは巨大な恒星の死から始まった

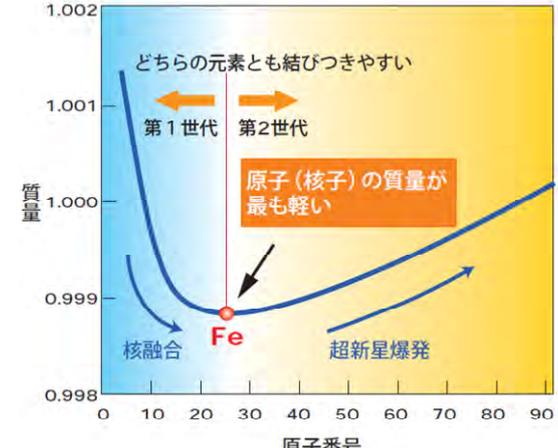

8



巨大な恒星の断面図。核融合により、Fe(原子番号26)までの元素がつくられる。  
 太陽は質量が小さいため、C(原子番号6)、O(原子番号8)までしか、つくられない。



どうして、Feで核反応が終了してしまうのか？



どちらの元素とも結びつきやすい  
 第1世代 ← 第2世代  
 原子(核子)の質量が最も軽い  
 核融合 → 超新星爆発

第1世代の核融合では原子同士が反応して熱量が発生する。つまり、核融合が進むと放熱による質量欠損によって原子は軽くなる。Feが最も軽い。  
 第2世代では、超新星爆発に伴う高温・高圧下で吸熱反応により、Fe以上の元素が生まれ、質量は増加することになる。(核分裂の際に熱を発生=原発)

<http://www.nssmc.com/company/nssmc/science/pdf/V15.pdf>より



### 地球の誕生…人体が必要とするミネラル


11

1 生体必須元素  
2 微量必須元素  
3 主要必須元素  
4 必須元素(量不明)

1 H																		2 He
3 Li	4 Be																	10 Ne
11 Na	12 Mg																	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	

多量に必要	微量必要	必要量不明		
Cl	0.7-7g	Fe	12 mg	S
K	2- 4g	Zn	15 mg	As
Na	< 10g	Mn	4 mg	Sn
P	900mg	Cu	2.5 mg	B
Ca	600mg	I	0.1 mg	Si
Mg	300mg	F	0.1 mg	Br
		Co	0.16 mg	Cd
		Se	0.13 mg	Pb
		Mo	0.15 mg	Li
		V	0.25 mg	
		Cr	0.29 mg	
		Ni	0.19 mg	

・様々な元素が生命維持に必要なミネラルである。

・鉄より原子番号の大きい元素も必須元素となっている。

創造主は我々の生命維持に必要な元素を与えた。

### 地球の誕生…原始地球の誕生から海の形成へ(1)

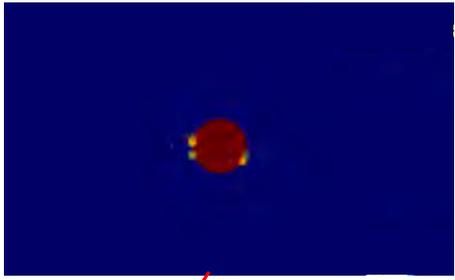
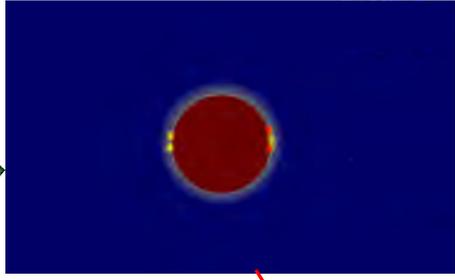

12

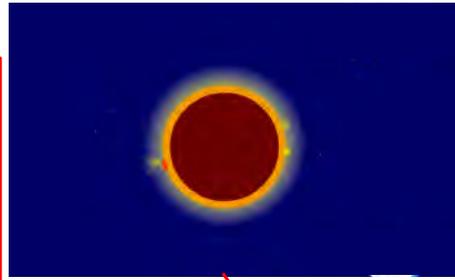
科学技術振興機構 理科ネットワークより

凡例

- 鉄とケイ酸塩の混合物
- 大気
- 金属鉄
- マグマオーシャン
- ケイ酸塩(岩石)
- 海洋

科学技術振興機構 理科ネットワークより



地球半径の0.25  
超新星爆発で飛び散った物質が微惑星となって原始地球に衝突し、徐々に半径が大きくなる。衝突によるエネルギーによってガスが噴出するようになる。

地球半径の0.4  
大気の形成が始まる。主要成分は水蒸気、二酸化炭素だと考えられている。微惑星の衝突が続く。

地球半径の0.5  
マグマオーシャンの形成

## 地球の誕生…原始地球の誕生から海の形成へ(2)

13

凡例

<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: red; border: 1px solid black;"></span> 鉄とケイ酸塩の混合物	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: yellow;"></span> 大気	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: orange;"></span> 金属鉄	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: lightblue;"></span> マグマオーシャン	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: brown;"></span> ケイ酸塩(岩石)	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: cyan;"></span> 海洋
--	--	---	---	---	--

科学技術振興機構 理科ネットワークより

地球半径の0.6  
 マグマオーシャンの底に沈んだ鉄などの金属成分が、一気に地球の中心に落下。落下する金属の重力エネルギーによって、地球内部は急激に高温になるとともに、核を形成した。

地球半径の1  
 原始海洋の形成。この頃には微惑星の衝突が減る。

海洋形成から1億年程度で地球は冷却。マグマオーシャンは消滅する。

40億年前には海洋の形成が終了していたと考えられている

## 海の誕生…海水はどのようにしてできたか？

14

海水は、揮発性物質(マグマオーシャンから発生した大気(原始大気))と火成岩が反応してできた。

- ・原始大気はCO<sub>2</sub>(下層)とH<sub>2</sub>O(上層)に分かれていた。

- ①大量のCO<sub>2</sub> は、マグマ中のMgOと反応  
 $MgO + CO_2 \rightarrow MgCO_3$ としてCO<sub>2</sub>を固定  
[http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0150a/contents/2631\\_f.html](http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0150a/contents/2631_f.html)
- ②温室効果が減少し、H<sub>2</sub>Oは雨となって地表を冷やす
- ③1000年にも及ぶ降雨(年間降雨量10m)により海が誕生
- ④雨には、マグマオーシャンからのHClなどが溶け込む  
 つまり、原始の海は酸性→岩石を溶かすことで中性に  
 NaClなどもこのとき生成
- ⑤中和反応で大量に生成したCaイオンはCO<sub>2</sub> と反応し、  
 $CO_2 + H_2O \rightarrow CO_3^{2-} + 2H^+$ (岩石の溶解で消滅)  
 $Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$   
 CaCO<sub>3</sub>(石灰岩)が大量に生成し、温室効果が減少  
[http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0150a/contents/2590\\_f.html](http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0150a/contents/2590_f.html)



## 海の誕生・・・海水はどのようにしてできたか？



15

・火成岩は、長石、輝石、カンラン石などが主成分。

基本的にはNa, K, Mg, Caなどとケイ酸, ポリケイ酸との塩。

Na, K, Mg, Caなどは強塩基, ケイ酸, ポリケイ酸は弱酸(例えば、曹長石( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ))

例えば、これらの物質と塩化水素(HCl)が反応すると、NaCl(塩)を生成する。

徐々に海水は、中性(実際は弱酸性)に変化していくとともに、塩分濃度が高くなった。

### 箱根大涌谷における火山ガスの温度、成分(一例)

出典:大場ら, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第40 巻, 1-10, 2008

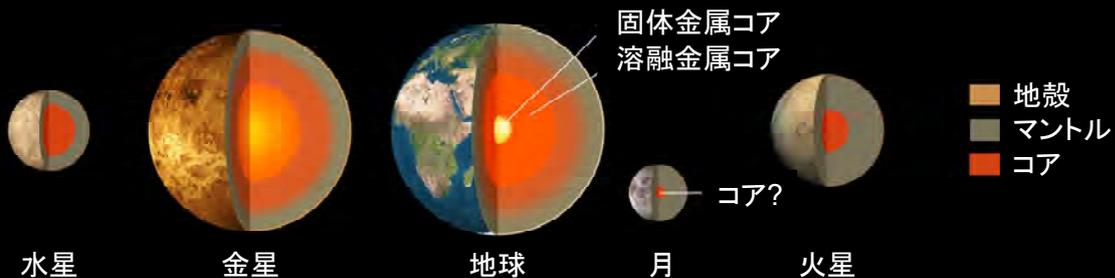
Date	temp. °C	H <sub>2</sub> O mmol/mol	CO <sub>2</sub> mmol/mol	H <sub>2</sub> S mmol/mol	SO <sub>2</sub> mmol/mol	HCl mmol/mol
2001/9/21	163.3	916.35	14.63	2.66	6.02	2.14
2001/11/2	136.0	310.69	8.66	1.75	0.17	0.13
2002/7/12	138.8	959.64	18.53	1.26	5.21	1.48
2003/10/22	141.7	922.33	8.15	1.89	3.44	0.22
2004/10/28	145.8	982.00	9.40	2.28	4.50	1.95
2005/10/25	152.0	987.00	6.57	3.99	1.78	0.17
2006/7/27	157.4	974.20	14.42	6.68	2.91	1.61
2006/11/2	143.0	980.40	14.27	2.24	2.58	0.30
2007/3/19	145.5	977.21	16.52	3.96	2.10	0.02
2007/9/10	132.4	981.90	12.05	3.98	1.66	0.24
2007/11/29	142.0	985.65	9.28	4.48	0.20	0.30
2008/3/27	143.7	986.01	8.61	3.61	1.47	0.19
2008/9/9	138.4	974.35	18.83	3.54	2.65	0.25



## 海の誕生・・・生物の誕生とCO<sub>2</sub>固定化(1)



16



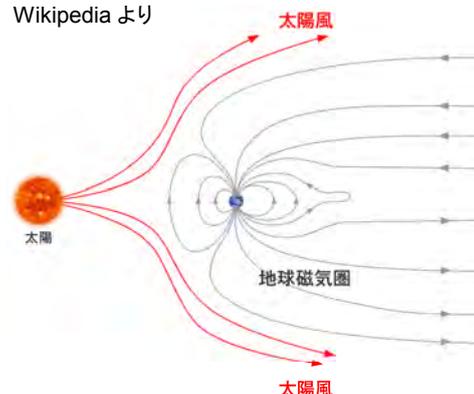
地球にはFe, Niなどの金属が溶融したコアがある。こうしたコアは金星、火星にはない。液体となったコアでは自転や熱対流によって回転することで電流が流れる(ダイナモ効果)。この電流によって磁場が生まれ、さらに磁場ができることで電流が流れ、次第に強力な磁場が形成されていく。

磁場によって、太陽から来る太陽風(プラズマ粒子の流れ)が直接地球の上にもふりそそぐことを防いでくれる。

磁場ができたことで、生物は海から陸(潮干帯)に上がることができるようになった。

創造主は我々に灼熱地獄から逃れる術を与えた。

Wikipedia より



## 海の誕生・・・生物の誕生とCO<sub>2</sub>固定化(2)



17

磁場によってプラズマの影響が弱まった結果として、**太陽光のエネルギーを利用する「光合成生物」が生まれた**。27億年前以降の世界各地の地層から、ストロマトライトという岩石が見つかり、シアノバクテリアという光合成を行う生物によってできたものだと考えられている。



Wikipedia より  
シアノバクテリア。シアノバクテリアは、非常に幅広い環境条件下で生きていけるため、大繁殖することで大気中のCO<sub>2</sub>を急激に減らした。現在も絶滅することなく生きのびている。

NaCl結晶  
メキシコの塩田で見られる高度好塩菌。紅色細菌(シアノバクテリア)ではないかといわれている。

シアノバクテリアの繁殖により、大気中のCO<sub>2</sub>は劇的に減少し、光合成によってつくられたO<sub>2</sub>に置き換わっていった。これによりオゾン(O<sub>3</sub>)層が形成され、陸上で生物が安全に生活可能な環境が備わっていった。また、CO<sub>2</sub>由来の炭素Cは生体内に固定されるようになる。**創造主は生物が繁殖する上で安全な環境を与えた。**

## 海の誕生・・・生物の誕生とCO<sub>2</sub>固定化(3)



18

動植物が大繁殖できる環境が整うと、CO<sub>2</sub>の炭素Cはこれらの生体内に固定されるようになる。海中の動植物の死骸は海底に堆積し、加圧や加熱されることによって分解され、石油などに变化した。**創造主は我々人間に豊かな生活を得る手段を与えた。**

余談：光合成によってCを生体内に固定するということは、太陽のエネルギーと生物の働きによって行われたもので、とてつもない時間を要したに違いない。もっと言えば、我々が生存するのに、邪魔だったCO<sub>2</sub>をエネルギーとして利用できるようになったのは太陽の力である。

産業革命以降、化石燃料が大量に消費されるようになり、加速度的にCはCO<sub>2</sub>に戻されて環境中に放出されている。**創造主の怒りに触れなければいいが。**

## 終わりに

- ・137億年前に起こったビッグバンでは、一瞬の間にこの宇宙を構成する物質の元が供給された。
- ・宇宙創成後、30万年でHやHeが生まれ、これらが集まることで恒星が誕生した。
- ・恒星の中で様々な元素が生まれる。Fe(原子番号26)が生成すると恒星は超新星爆発を起こす。
- ・超新星爆発によって鉄より原子番号が大きい元素ができる。
- ・超新星爆発を起こした恒星の残骸を原料として、46億年前に太陽系が生まれた。
- ・地球を構成している元素も恒星の残骸であり、今ではU(原子番号92)までの元素が存在。
- ・マグマオーシャンからのガス(H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>)が原始大気に。CO<sub>2</sub>はMgCO<sub>3</sub>として除去。
- ・原始大気中のCO<sub>2</sub>が減少すると大量の雨が降り、海が形成される。CO<sub>2</sub>はCaCO<sub>3</sub>として除去。
- ・大気中の酸成分(HClなど)と火成岩(Na、Ca、Mg塩など)が反応し、塩分濃度が上昇。
- ・シアノバクテリアの光合成反応により、CO<sub>2</sub>はさらに減少。現在の大气と海が完成。

## Memo

## Salt and Seawater Science Seminar 2012

### 元素の世界から眺める海水の科学



## 海水を構成する元素、その特徴と分離方法

海水総合研究所 正岡功士

### 講演内容



2

#### 話題1 海水を構成する元素の特徴

- Q. 海を構成する元素にはどのような物がありますか？
- Q. 海水中に存在する元素は、どのくらいの量がありますか？

#### 話題2 分離回収技術の例

- Q. 海水に溶けている資源はどうすれば回収できますか？
- Q. 実際に実用化されている回収技術にはどのような物がありますか？

#### 話題3 海水資源回収の将来

- Q. 他の元素が回収できないのはなぜですか？
- Q. 今後、新たな資源が海水から回収されることは無いのですか？
- Q. 海水総合研究所ではどのような検討をしていますか？

話題1 海水を構成する元素の特徴

3

Q. 海を構成する元素にはどのような物がありますか？

海に存在する元素の例



・海水中に存在している元素

水素、酸素 ←水  
 ナトリウム、塩素 ←塩  
 など

・海産生物中に蓄積される元素

ヨウ素 ←海藻  
 ヒ素 ←貝  
 など



・海底に堆積している元素

マンガン ←マンガン団塊  
 など




---

---

---

---

---

---

---

---

4

海水中に存在している元素の存在形態

溶存ガス

ガス状態で溶存している  
 He、Neなど

イオン

イオンとして溶存している  
 Na(→ Na<sup>+</sup>)、Cl(→ Cl<sup>-</sup>) など

錯体、錯イオン

他のイオンと結合して錯体、錯イオンを形成している  
 Ag<sup>+</sup>(→AgCl<sub>2</sub><sup>-</sup>) など

オキソ酸、オキソアニオン

海水中の酸素原子と結合して存在している  
 C(→HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、S(→SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) など

---

---

---

---

---

---

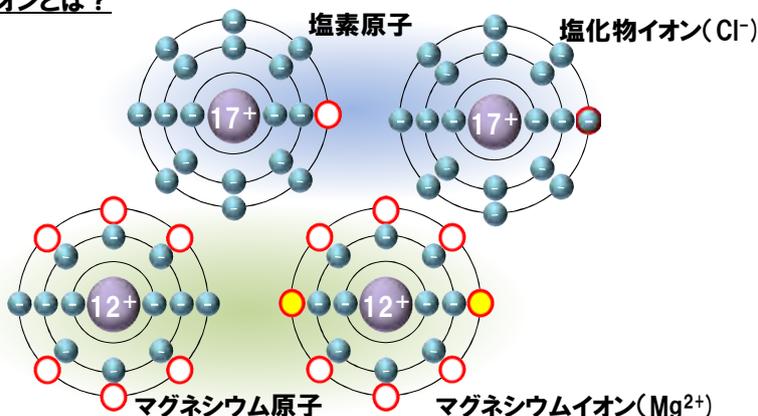
---

---

海水中に存在している元素の多くはイオン状態で存在している。

5

イオンとは？



最も外側の電子殻が埋まるように電子の数が変化して帯電した原子やその集合体をイオンと呼ぶ。

---

---

---

---

---

---

---

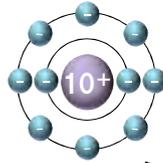
---

6

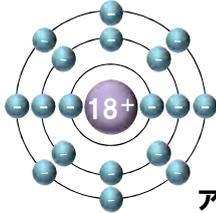
溶存ガスとして存在する元素の特徴



ヘリウム原子



ネオン原子



アルゴン原子

原子の最も外側の電子殻が埋まっている元素はガスとして溶存している。

---

---

---

---

---

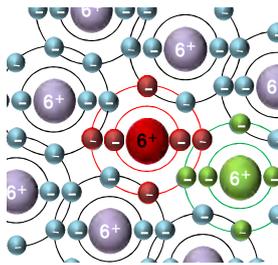
---

---

---

7

錯体、錯イオンとは？



炭素の共有結合  
(ダイヤモンド)



銀と塩素の配位結合による錯イオン  
(ジクロロ銀(I)酸イオン)

共有結合の一種である配位結合により形成された分子を錯体と呼ぶ。  
 電荷が打ち消しあっていない錯体は錯イオンと呼ぶ。

---

---

---

---

---

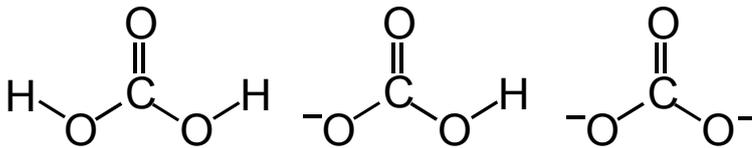
---

---

---

8

オキソ酸、オキソアニオンとは？



炭素のオキソ酸、オキソアニオン  
(炭酸、炭酸水素イオン、炭酸イオン)

ある原子と酸素原子との共有結合により形成され、酸の性質をもつものをオキソ酸とよぶ。オキソ酸から水素イオンが解離して生成する陰イオンをオキソアニオンと呼ぶ。

---

---

---

---

---

---

---

---

9

# 海水の元素組成

1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
H		He		Li		Be		B		C		N		O		F		Ne	
55.5 H <sub>2</sub> O		1.7 × 10 <sup>-9</sup> He		25 × 10 <sup>-6</sup> Li <sup>+</sup>		22 × 10 <sup>-12</sup> BeOH <sup>+</sup>		0.42 × 10 <sup>-3</sup> HBO <sub>3</sub>		2.2 × 10 <sup>-3</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0.59 × 10 <sup>-3</sup> N <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0.25 × 10 <sup>-3</sup> O <sub>2</sub>		68 × 10 <sup>-6</sup> F <sup>-</sup>		7 × 10 <sup>-9</sup> Ne	
0.4691 Na <sup>+</sup>		0.4691 Na <sup>+</sup>		0.0102 K <sup>+</sup>		0.0527 Mg <sup>2+</sup>		1 × 10 <sup>-9</sup> Al(OH) <sub>3</sub> <sup>0</sup>		0.11 × 10 <sup>-3</sup> H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>		2 × 10 <sup>-6</sup> H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		0.0846 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0.546 Cl <sup>-</sup>		12 × 10 <sup>-6</sup> Ar	
1.45 × 10 <sup>-6</sup> Rb <sup>+</sup>		89 × 10 <sup>-6</sup> Sr <sup>2+</sup>		0.0102 K <sup>+</sup>		0.0527 Mg <sup>2+</sup>		1 × 10 <sup>-9</sup> Al(OH) <sub>3</sub> <sup>0</sup>		0.11 × 10 <sup>-3</sup> H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>		2 × 10 <sup>-6</sup> H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>		0.0846 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		0.546 Cl <sup>-</sup>		12 × 10 <sup>-6</sup> Ar	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm	
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96	
Fr		Ra		Ac		Th		Pa		U									

10

Q. 海水中に存在する元素は、どのくらいの量がありますか？

海水中の濃度と鉱石中の濃度との比較(1)

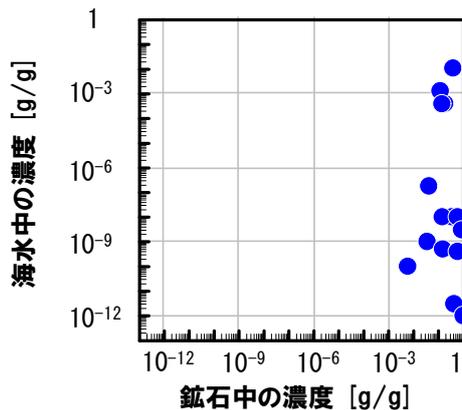
	海水中濃度 [g/g] × 10 <sup>6</sup>	代表的な鉱石中の 元素濃度 [g/g]	鉱石名
Na	10780	0.39	岩塩 (NaCl)
Ca	400	0.19	石灰石 (CaCO <sub>3</sub> )
Mg	1294	0.12	マグサイト (MgCO <sub>3</sub> )
K	387	0.14	カーナリット (KC I · MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O)
Li	0.18	0.042	アンブリゴナイト (LiAl (SiO) <sub>3</sub> )
Fe	0.01	0.35	ヘマタイト (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Al	0.01	0.15	ボーキサイト (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、55%含有)
Mo	0.01	0.60	輝水鉛鉱 (MoS <sub>2</sub> )
U	0.003	0.88	閃ウラン鉱 (UO <sub>2</sub> )
V	0.001	0.036	褐鉛鉱 (Pb <sub>5</sub> (VO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH)
Ni	0.0005	0.154	珪ニッケル鉱 (Ni <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )
Zn	0.0004	0.50~0.67	閃亜鉛鉱 (ZnS、75~100%含有)
Cu	0.0001	0.006	斑岩銅鉱床 (Cu、0.6%含有)
Ag	0.000003	0.44	輝銀鉱 (Ag <sub>2</sub> S)
Au	0.000001	1	砂金

Wikipedia

日本海水学会、ソルト・サイエンス研究財団共編、「海水の科学と工業」、P394

11

海水中の濃度と鉱石中の濃度との比較(2)



各元素の海水中の濃度は非常に低い。

12

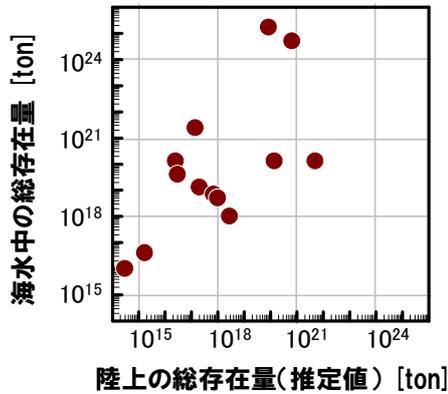
海水中の存在量と鉱石中の存在量との比較(1)

	海水中の総量 [ton]	陸上資源としての総量 (推定値) [ton]
Mg	1.7 × 10 <sup>16</sup>	8.5 × 10 <sup>10</sup>
K	5.0 × 10 <sup>15</sup>	6.5 × 10 <sup>11</sup>
Li	2.4 × 10 <sup>12</sup>	1.4 × 10 <sup>8</sup>
Fe	1.3 × 10 <sup>11</sup>	5 × 10 <sup>12</sup>
Al	1.3 × 10 <sup>11</sup>	1.4 × 10 <sup>11</sup>
Mo	1.3 × 10 <sup>11</sup>	2.5 × 10 <sup>7</sup>
U	4.0 × 10 <sup>10</sup>	3 × 10 <sup>7</sup>
V	1.3 × 10 <sup>10</sup>	2 × 10 <sup>8</sup>
Ni	7 × 10 <sup>9</sup>	7 × 10 <sup>8</sup>
Zn	5 × 10 <sup>9</sup>	1.0 × 10 <sup>9</sup>
Cu	1 × 10 <sup>9</sup>	2.8 × 10 <sup>9</sup>
Ag	4 × 10 <sup>7</sup>	1.7 × 10 <sup>6</sup>
Au	1 × 10 <sup>7</sup>	3 × 10 <sup>5</sup>

日本海水学会、ソルト・サイエンス研究財団共編、「海水の科学と工業」、P394

13

海水中の存在量と鉱石中の存在量との比較(2)



海水は量が多いため、元素も膨大に存在している。

---

---

---

---

---

---

---

---

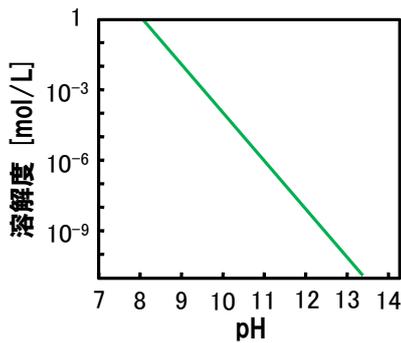
---

---

話題2 分離回収技術の例 14

Q. 海水に溶けている資源はどうすれば回収できますか？

水酸化マグネシウム溶解度のpH依存性



下田正雄、産業公害、13、11、P29

pHを高めて溶解度を下げること、水酸化マグネシウムを析出させることができる。

---

---

---

---

---

---

---

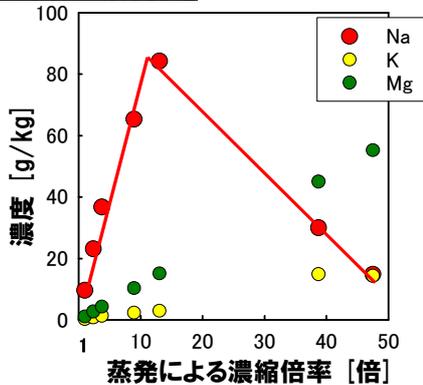
---

---

---

15

蒸発濃縮による海水の成分変化



塩事業センター、海水と製塩—データブック—、P46

海水の水分を蒸発させて濃度を向上させることで、塩化ナトリウムを析出させることができる。

---

---

---

---

---

---

---

---

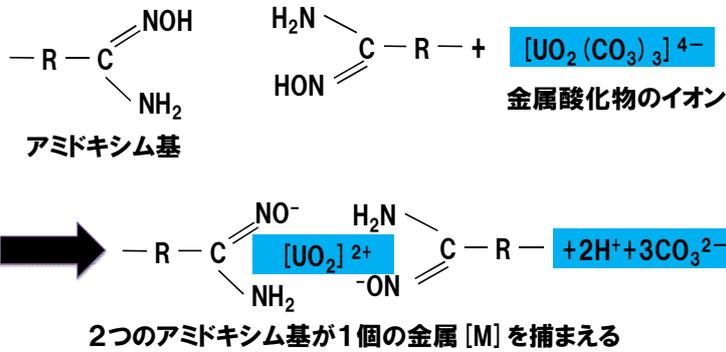
---

---



19

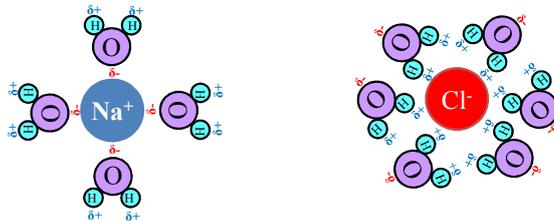
**アミドキシム基による金属酸化物イオンの捕捉**



官能基を利用して、海水からイオンを分離することができる。

20

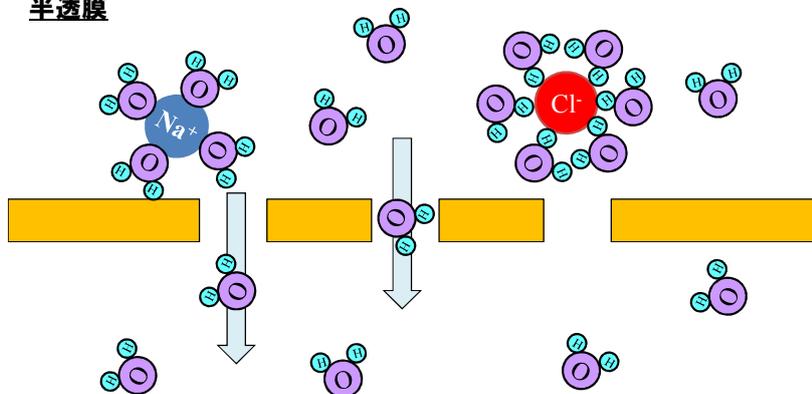
**イオンの水和**



イオンは水分子を引き寄せて、水和イオンを形成している。

21

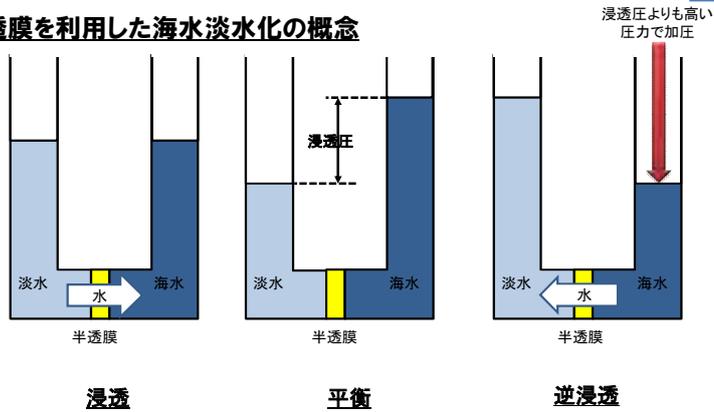
**半透膜**



半透膜は水分子を通し、水和したイオンを通さない。

22

半透膜を利用した海水淡水化の概念




---

---

---

---

---

---

---

---

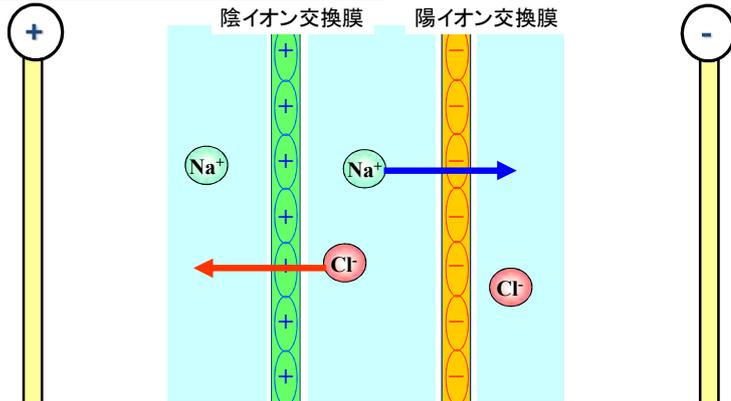
---

---

逆浸透法を用いて、海水から水を分離することができる。

23

半透膜を利用した海水淡水化の概念



陽イオン交換膜は、陽イオンを通し、陰イオンを通さない。  
 陰イオン交換膜は、陰イオンを通し、陽イオンを通さない。

---

---

---

---

---

---

---

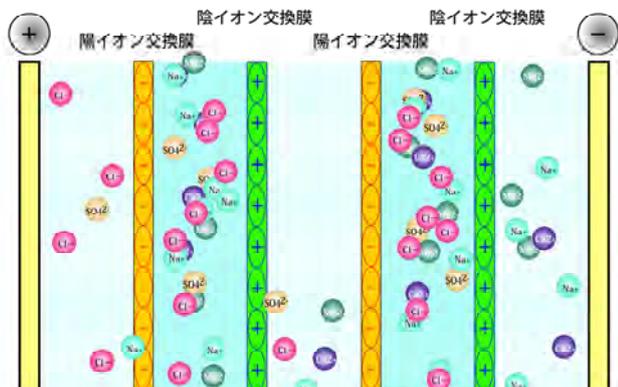
---

---

---

24

電気透析槽の概要



電圧をかけると濃縮される部屋と希釈される部屋とが交互にできる。  
 イオン交換膜を用いて、海水からイオンを分離することができる。

---

---

---

---

---

---

---

---

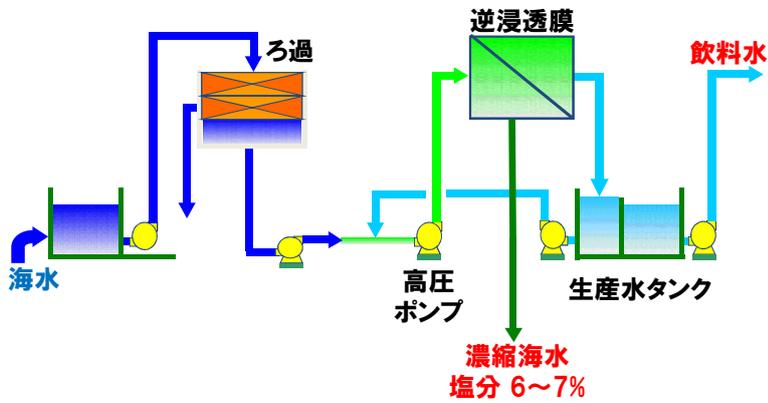
---

---

25

Q. 実際に応用されている回収技術にはどのようなものがありますか？

逆浸透膜を利用した海水淡水化プロセス




---

---

---

---

---

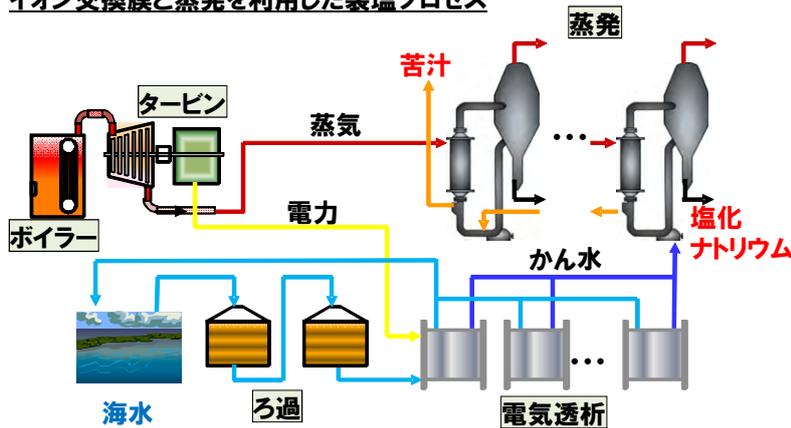
---

---

---

26

イオン交換膜と蒸発を利用した製塩プロセス




---

---

---

---

---

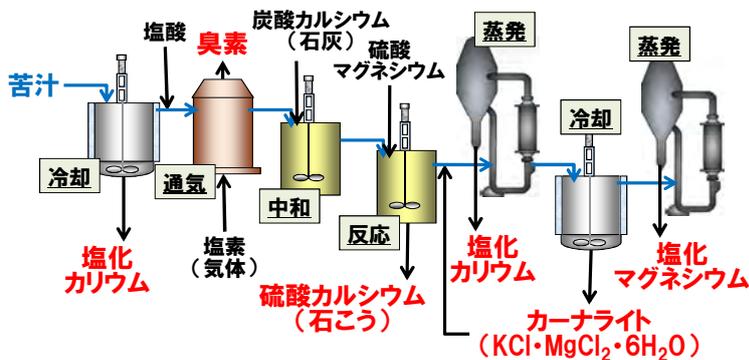
---

---

---

27

製塩苦汁を原料とした各種資源回収プロセス




---

---

---

---

---

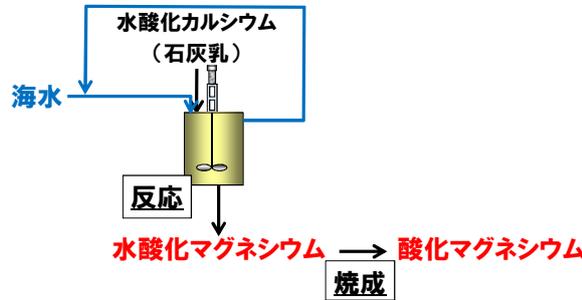
---

---

---

28

海水を原料とした酸化マグネシウム回収プロセス




---

---

---

---

---

---

---

---

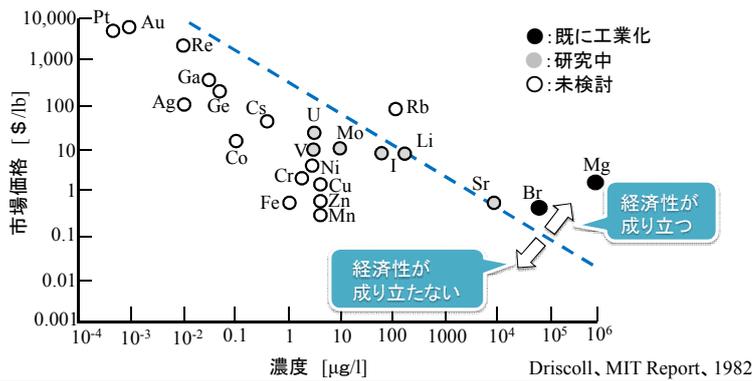
---

---

話題2 海水資源回収の将来  
 Q. 他の元素が回収できないのはなぜですか？

29

Driscollの経済性評価(1982)



市場価格と海水中の濃度(分離の難易度)との関係から経済性が成り立つ元素は限られている。

---

---

---

---

---

---

---

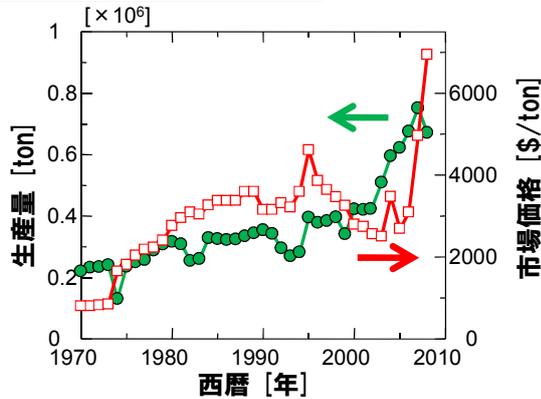
---

---

---

30

Q. 今後、新たな資源が海水から回収されることは無いのですか？  
 金属マグネシウム市場価格の経時変化



滝山、大村、正岡、三角、松本、尾上、日本海水学会誌、64、6、P318(2010)

各元素の市場価格は変動し、近年は上昇傾向にある。

---

---

---

---

---

---

---

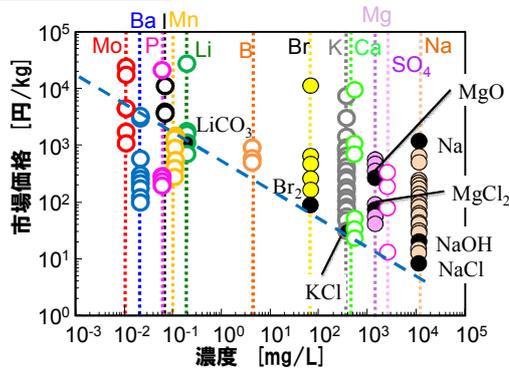
---

---

---

31

経済性の再評価(2007)

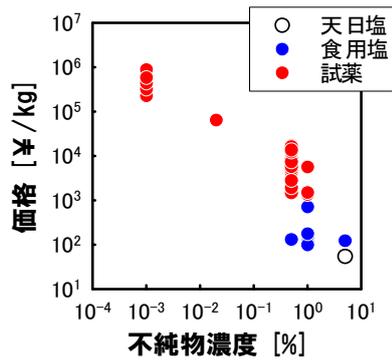


滝山、大村、正岡、三角、松本、尾上、日本海水学会誌、64、6、P318(2010)

市場価格の変動、対イオンを工夫することで採算性が見込める可能性がある。

32

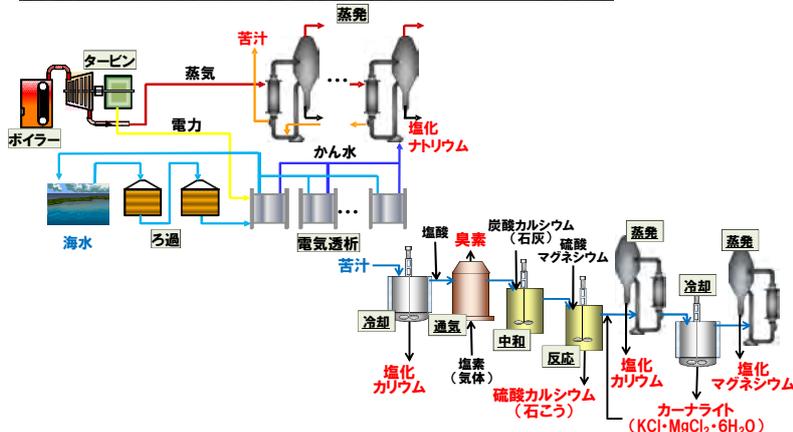
価格と不純物濃度との関係(塩化ナトリウム)



高純度化などの付加価値を付ける技術を開発することで、市場価値を高めることができる。

33

製塩苦汁を原料とした各種資源回収プロセスの全体像



プロセスの統合によりすることで生産コストを削減できる。

34

Q. 海水総合研究所ではどのような検討をしていますか？

海水総合研究所の製塩技術開発

製塩技術のイノベーション

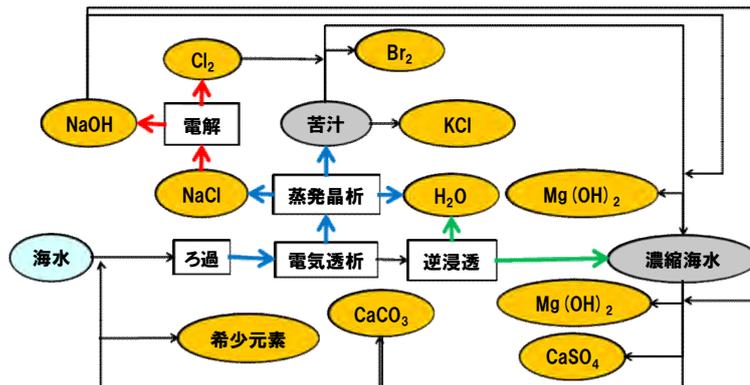
- ・高速ろ過装置の開発
- ・次世代イオン交換膜の開発
- ・高効率晶析装置の開発
- ・耐食性材料の適正な選定手法の開発

→詳細はポスターセッションにて

製塩プロセスについての研究開発は海水資源回収に応用できる。

35

海水総合利用プロセスの例

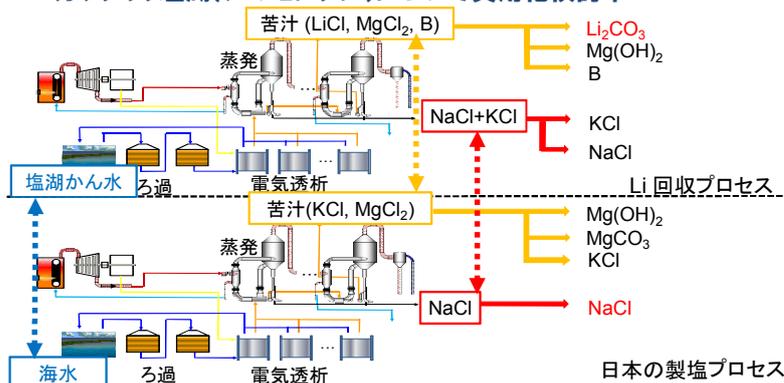


製塩プロセスと他のプロセスとの組み合わせによるシナジー効果について検討中

36

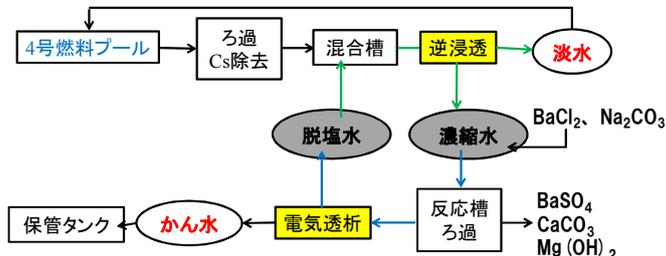
海水総合研究所の応用研究例 (1)

- ・南米塩湖かん水からのリチウム回収  
 →三菱商事と共同でウユニ塩湖(ボリビア)、  
 カウチャリ塩湖(アルゼンチン)について実用化検討中



海水総合研究所の応用研究例 (2)

・福島第1原発汚染海水からの脱塩による循環利用  
 →基本設計を担当し、4号機プールなどで活用



製塩プロセス、海水综合利用プロセスの一部を様々なプロセスに応用して実用化しており、海水综合利用の実現に向けて前進している。

まとめ



海水を構成する元素、その特徴と分離方法

話題1 海水を構成する元素の特徴

- ・自然界に存在する元素はほとんど海水中にも存在している
- ・海水中に存在している元素の多くはイオンの状態で存在している。
- ・海水中の濃度は元素により大きく異なる。
- ・鉱石と比較すると濃度は非常に低いが、量は非常に多い。

話題2 分離回収技術の例

- ・イオンの性質に着目することで様々な回収方法が考えられる。
- ・水、塩のほか、マグネシウム、カリウム、カルシウム、臭素などの回収が実用化されており、それらの技術は主に日本で開発されている。

話題3 海水資源回収の将来

- ・実用化には経済性の評価が重要である。市場価格の変動、回収する化合物の付加価値化、プロセスの統合などにより、経済性を高めることができる。
- ・海水総合研究所においては、日本独自の製塩技術をベースとした海水資源回収技術の確立を目指して検討を進めている。

Salt and Seawater Science Seminar 2012

元素の世界から眺める海水の科学



元素から見た放射能 Q&A

話題

- 1 原子力について
- 2 海水への放射能汚染
- 3 放射能の測定
- 4 放射能測定の実際

海水総合研究所  
野田 寧

	原理	制御	エネルギーの取り出し	3
核分裂	<p>中性子が当たるとウランは割れて中性子と核分裂生成物となるが、この時大きなエネルギーが放出される。ウラン燃料 1g は石油 1.8 トン分のエネルギーに相当。</p>	<p>制御棒で制御する</p> <p>燃料 制御棒</p> <p>核分裂によって発生する中性子を水などを使って遅い中性子にすると共に、制御棒を使って核分裂反応の量を調整する。</p>	<p>(沸騰水型)</p> <p>格納 送電 変圧器 発電機 蒸気 水 復水器 放水路へ 冷却水 (海水) 循環水ポンプ 冷却水ポンプ</p> <p>中性子のエネルギーにより冷却材 (水など) を加熱して、その蒸気を発生させ、タービンを回し発電する。</p>	
核融合	<p>重水素の原子核と三重水素の原子核が衝突して融合し、ヘリウムと中性子になる。この時莫大なエネルギーが放出される。核融合燃料 1g は石油 8 トン分のエネルギーに相当。</p>	<p>燃料供給と外部入力の増減で制御する</p> <p>ブランケット プラズマ 燃料供給 (重水素、三重水素) 外部入力 中性子 ヘリウム灰排気</p> <p>燃料 (重水素と三重水素) の供給量と外部入力の増減で、プラズマの密度と温度を制御して核融合出力を調整する。</p>	<p>(トカマク型)</p> <p>送電 プラズマ加熱装置 プランケット 熱水 熱交換器 タービン発電機</p> <p>中性子のエネルギーはブランケットで受けとめ、ブランケット内を通る冷却材 (水など) を加熱し、その熱で蒸気を発生させタービンを回し発電する。</p>	

[文部科学省研究開発局核融合開発室]


2

## 話題1 原子力について

原子力エネルギー

原子力発電所での核分裂とは？

なぜセシウムが注目されるのか

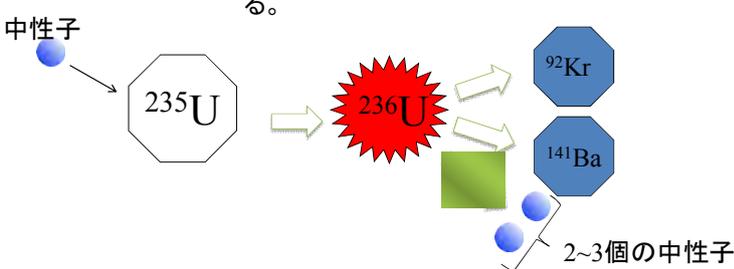

4

### 話題1 原子力について

原子力発電所での核分裂とは？

**原子力発電所** 主な沸騰水型原子炉(BWR)では、燃料はウラン-238が約95%、ウラン-235が約5%である。

**原子炉内の核分裂** ウラン-235は中性子を取り込んで、ウラン-236になる。これは非常に不安定であるため核分裂して、2つの原子と2~3個の中性子に分裂する。



---

---

---

---

---

---

---

---

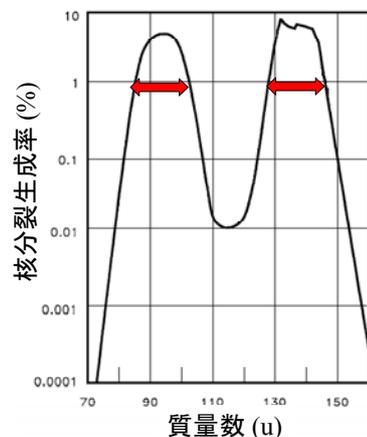

5

### 話題1 原子力について

なぜセシウムが注目されるのか

**核分裂反応で生成する原子**

U-235が核分裂した時に生じる原子の質量数分布



85~100の質量数の原子と130~140の質量数の原子が主に生成する

H. W. Schmitt, J. H. Neiler, and F. J. Walter, "Fragment Energy Correlation Measurements for <sup>252</sup>Cf Spontaneous Fission and <sup>235</sup>U Thermal-Neutron Fission", Phys. Rev. 141, 1146-1160 (1966)

---

---

---

---

---

---

---

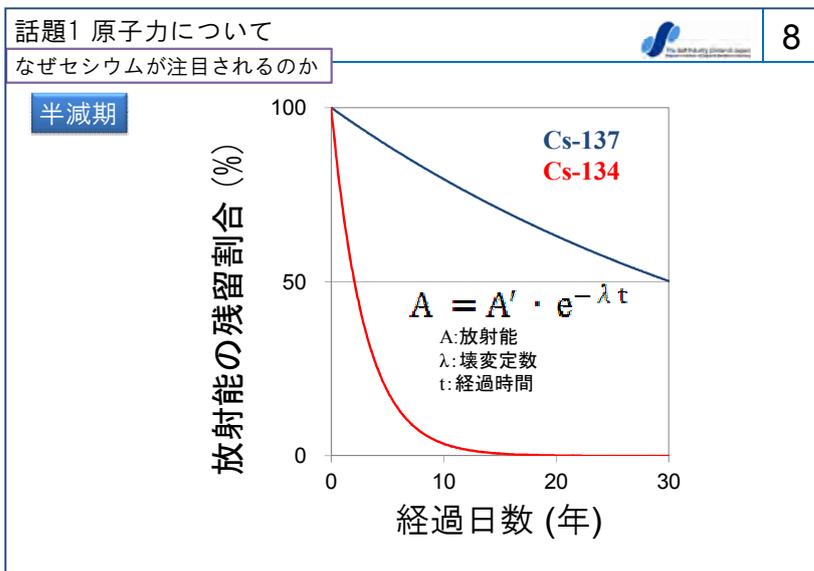
---

話題1 原子力について		福島第一原子力発電所事故により放出された全ての放射性物質		6	
なぜセシウムが注目されるのか					
質量数が85~100の放射性物質		質量数が130~140の放射性物質		その他の放射性物質	
核種	放出量 (Bq)	核種	放出量 (Bq)	核種	放出量 (Bq)
Sr-89	$2.0 \times 10^{15}$	Xe-133	$1.1 \times 10^{19}$	Np-239	$7.6 \times 10^{18}$
Sr-90	$1.4 \times 10^{14}$	I-131	$1.6 \times 10^{17}$	Pu-241	$1.2 \times 10^{12}$
Zr-95	$1.7 \times 10^{13}$	Te-132	$8.8 \times 10^{16}$	Cm-242	$1.0 \times 10^{11}$
Y-91	$3.4 \times 10^{12}$	I-133	$4.2 \times 10^{16}$	Pu-238	$1.9 \times 10^{10}$
Ru-103	$7.5 \times 10^9$	Cs-134	$1.8 \times 10^{16}$	Pu-239	$3.2 \times 10^9$
Mo-99	$6.7 \times 10^9$	Cs-137	$1.5 \times 10^{16}$	Pu-240	$3.2 \times 10^9$
Ru-106	$2.1 \times 10^9$	Sb-127	$6.4 \times 10^{15}$		
		Te-131m	$5.0 \times 10^{15}$		
		Te-129m	$3.3 \times 10^{15}$		
		Ba-140	$3.2 \times 10^{15}$		
		I-135	$2.3 \times 10^{15}$		
		Te-127m	$1.1 \times 10^{15}$		
		Sb-129	$1.4 \times 10^{14}$		
		Ce-141	$1.8 \times 10^{13}$		
		I-132	$1.3 \times 10^{13}$		
		Nd-147	$1.6 \times 10^{12}$		
		Ce-144	$1.1 \times 10^{13}$		
		Pr-143	$4.1 \times 10^{12}$		

原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書  
 一東京電力福島原子力発電所の事故について一  
 原子力災害対策本部より引用

話題1 原子力について		福島第一原子力発電所事故により放出された全ての放射性物質		7
なぜセシウムが注目されるのか				
核種	半減期	核種	半減期	
I-132	2時	Ru-103	39日	
Sb-129	4時	Sr-89	51日	
I-135	7時	Y-91	59日	
I-133	21時	Zr-95	64日	
Te-131m	30時	Te-127m	109日	
Mo-99	66時	Cm-242	163日	
Te-132	78時	Ce-144	284日	
Np-239	2日	Ru-106	1年	
Sb-127	4日	Cs-134	2年	
Xe-133	5日	Pu-241	14年	
I-131	8日	Sr-90	29年	
Nd-147	11日	Cs-137	30年	
Ba-140	13日	Pu-238	88年	
Pr-143	14日	Pu-240	6537年	
Ce-141	33日	Pu-239	24065年	
Te-129m	34日			

原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書  
 一東京電力福島原子力発電所の事故について一  
 原子力災害対策本部より引用



話題1 原子力について なぜセシウムが注目されるのか 今後モニターが必要である放射性物質	<b>9</b>																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">核種</th> <th style="text-align: left;">半減期(年)</th> <th style="text-align: left;">放出された量(Bq)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cs-134</td> <td>2</td> <td><math>1.8 \times 10^{16}</math></td> </tr> <tr> <td>Cs-137</td> <td>30</td> <td><math>1.5 \times 10^{16}</math></td> </tr> <tr> <td>Sr-90</td> <td>29</td> <td><math>1.4 \times 10^{14}</math></td> </tr> <tr> <td>Pu-241</td> <td>14</td> <td><math>1.2 \times 10^{12}</math></td> </tr> <tr> <td>Pu-238</td> <td>88</td> <td><math>1.9 \times 10^{10}</math></td> </tr> <tr> <td>Pu-240</td> <td>6537</td> <td><math>3.2 \times 10^9</math></td> </tr> <tr> <td>Pu-239</td> <td>24065</td> <td><math>3.2 \times 10^9</math></td> </tr> <tr> <td>Ru-106</td> <td>1</td> <td><math>2.1 \times 10^9</math></td> </tr> </tbody> </table>	核種	半減期(年)	放出された量(Bq)	Cs-134	2	$1.8 \times 10^{16}$	Cs-137	30	$1.5 \times 10^{16}$	Sr-90	29	$1.4 \times 10^{14}$	Pu-241	14	$1.2 \times 10^{12}$	Pu-238	88	$1.9 \times 10^{10}$	Pu-240	6537	$3.2 \times 10^9$	Pu-239	24065	$3.2 \times 10^9$	Ru-106	1	$2.1 \times 10^9$	半減期が年単位である物質 以外は、既に検出できない レベルになっている。  食品中の放射能濃度は 放射性セシウムを測定する。  Sr-90、Pu類、Ru-106は、セシ ウム換算して基準化されて いる。  <small>文部科学省、「食品中の放射性物質                  に係る新基準値の誘導の考え方」</small>
核種	半減期(年)	放出された量(Bq)																										
Cs-134	2	$1.8 \times 10^{16}$																										
Cs-137	30	$1.5 \times 10^{16}$																										
Sr-90	29	$1.4 \times 10^{14}$																										
Pu-241	14	$1.2 \times 10^{12}$																										
Pu-238	88	$1.9 \times 10^{10}$																										
Pu-240	6537	$3.2 \times 10^9$																										
Pu-239	24065	$3.2 \times 10^9$																										
Ru-106	1	$2.1 \times 10^9$																										

---

---

---

---

---

---

---

---

話題2 海水への放射能汚染  放射性セシウムの放出量 海水中の放射性セシウムの除去	<b>10</b>
--	-----------

話題2 海水への放射能汚染 放射性セシウムの放出量	<b>11</b>
5枚目のスライド参照 Cs-137は $1.5 \times 10^{16}$ Bq $1 \text{ Bq} = 0.312 \times 10^{-12} \text{ g}$ $(0.312 \times 10^{-12} \text{ g/Bq}) \times (1.5 \times 10^{16} \text{ Bq}) = 0.47 \times 10^4 \text{ g}$ <b>4.7 kg</b>	
PCBの使用量の推移 	
物質質量としては、非常に少量 <small>磯野直秀(1975):化学物質と人間—                  PCBの過去・現在・未来、中央公論社</small>	

---

---

---

---

---

---

---

---

話題2 海水への放射能汚染  
 海水中の放射性セシウムの除去

 12

**海水中のセシウム量**

1Lの海水に含まれるCs-137は、1 mBq程度と仮定  
文部科学省による海域モニタリング結果より

海洋に放出されたCs-137は、 $8.45 \times 10^{15}$  Bq と推測されている。

$$\frac{15 \times 0.5 + (0.94 + 0.0096)}{1} = 8.45 \quad \text{単位: ペタベクレル}$$

放出されたCs-137の内、海洋に流れた割合50%

2回の海洋放出

独立行政法人日本原子力研究開発機構、  
 “太平洋における放射能濃度分布のシミュレーションについて”、  
 平成23年6月24日 文部科学省プレス発表

$8.45 \times 10^{18}$  Lの海水を処理する必要がある。  
 琵琶湖の水量  $2.75 \times 10^{13}$  L

→ 約300,000個の琵琶湖分を処理することになる。

---

---

---

---

---

---

---

---

話題2 海水への放射能汚染  
 海水中の放射性セシウムの除去

 13

高濃度汚染海水(1000Bq/L)中の放射性セシウムを除去する

海水中の放射性Cs = 1000 Bq/L =  $0.3 \times 10^{-9}$  g/L

海水中のCs =  $0.3 \times 10^{-6}$  g/L

放射性セシウムの除去 → セシウム全ての除去

高度に汚染された海水であっても、除染するためには海水に通常含まれている大量のセシウムを除去しなければならない。

海洋汚染は修復することが困難である。  
 ↓  
 今後も放射能をモニター(測定)することが必要である。

---

---

---

---

---

---

---

---


14

## 話題3 放射能の測定

放射線の種類

放射線を目で見る

放射線測定の種類


15

### 話題3 放射能の測定

放射線の種類

放射性物質は、エネルギーが高い状態であるためよりエネルギーレベルの低い安定な原子核になろうと放射線を放出する。

α線

ヘリウム原子核の放出

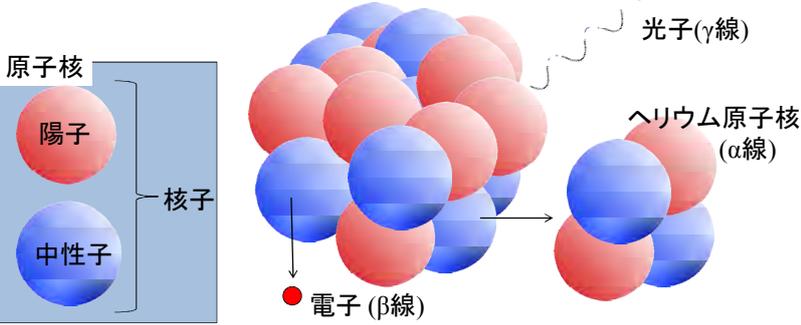
余分なエネルギーは

γ線

β線

電子の放出

放出して調節



原子核

陽子

中性子

核子

光子(γ線)

ヘリウム原子核 (α線)

電子(β線)

---

---

---

---

---

---

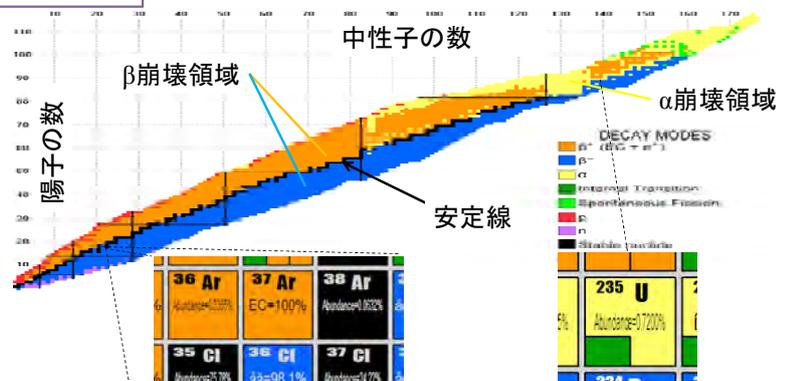
---

---


16

### 話題3 放射能の測定

放射線の種類



陽子の数

中性子の数

β崩壊領域

α崩壊領域

安定線

<sup>36</sup> Ar Abundance=0.336%	<sup>37</sup> Ar EC=100%	<sup>38</sup> Ar Abundance=0.329%
<sup>35</sup> Cl Abundance=75.76%	<sup>36</sup> Cl ββ=98.1%	<sup>37</sup> Cl Abundance=24.22%
<sup>34</sup> S Abundance=4.29%	<sup>35</sup> S ββ=100%	<sup>36</sup> S Abundance=0.02%

<sup>235</sup> U Abundance=0.7200%
---------------------------------------

G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, "The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties", *Nuclear Physics A*, vol. 729, p. 3-128 (2003)

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 17

放射線の種類

**放射線の遮蔽イメージ**

鉛などの厚い板 アルミニウムなどの薄い金属板

紙

α線 (ヘリウムの原子核)

β線 (電子)

γ線 (光子)

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 18

放射線を目で見える

**α線**

放射線は見える化できる  
測定するには特殊な方法が必要

直線の太い飛跡がα線(ヘリウム)の飛跡  
空気中のラドン-222から放出

**β線**

放射線を見てみよう  
[http://fiab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/ippan/hcloudchamber\\_movie/](http://fiab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/ippan/hcloudchamber_movie/)  
 (alpha and beta rays in a cloud chamber – Youtube2)

細く、縮れた髪の毛のように見える飛跡がβ線の飛跡  
β線(電子)は空気中の窒素や酸素にぶつかって曲がる。

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 19

放射線測定の種類

**α線**

透過力が弱い⇒ 試料から不純物を除き、薄い試料を作り、真空中で測定

Canberra製 α線スペクトロメーター

**物質を透過できないため、単離する処理が必要**

現実にはウランやプルトニウムなどは、α線スペクトロメーターでは処理が困難なため、ICP-MSIによる質量分析が用いられる。

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 20

放射線測定の種類

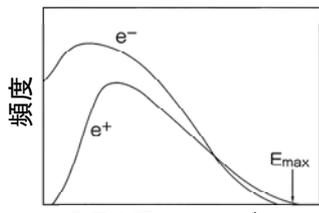
**β線** エネルギーが連続スペクトル

エネルギーを分け合う

中性子 → 陽子 + e<sup>-</sup> + ν̄  
ニュートリノ



Canberra製 β線計数器



電子の運動エネルギー

図1 β壊変で放出される電子、陽電子のエネルギー分布

ATOMICA β壊変より

物質を特定できないため、  
単離する処理が必要

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 21

放射線測定の種類

ストロンチウム-90の分析

試料を溶解

↓

アルカリ性

↓

シュウ酸沈殿

↓

イオン交換カラムでCaとSrを分離

↓

Yを水酸化鉄により除去

2週間放置

↓

Y-90が生成

↓

Yのみを沈殿分離

↓

β線測定器により測定

手間がかかり迅速にできない

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 22

放射線測定の種類

**γ線** α崩壊、β崩壊、核分裂等によりできた新しい元素がエネルギー過剰なときにγ線(光子)を放出して安定化する。

透過力が高いので試料を前処理なしで測定できる。  
核種由来のエネルギーが正確に決まっている。

→ 非常に簡単に測定できる

**Nal(Tl)シンチレーション検出器**

ヨウ化ナトリウムにタリウムを0.1%程度添加した結晶

サーベイメータが多い

**ゲルマニウム半導体検出器**

ゲルマニウムの高純度結晶

定量用が多い

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定

放射線測定の種類

NaIシンチレーションサーベイメータ

見える化

結晶内で発光

光を電子に変換

電子を増幅

電流を計測

増幅器

キャンベラ製インスペクター1000  
 ※NaIの代わりにLaBr<sub>3</sub>を装着

当所の測定器はヨーロッパ規格で校正されているため日本用に  
 変換(校正)が必要。

23

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定

放射線測定の種類

常温で測定できるため、持ち運びやすく、隠れた線源、汚染を見つけるためのサーベイメータとして使用されることが多い

ここら辺少し高い

メーターに反応あり!

発生源発見っ!

24

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定

放射線測定の種類

ゲルマニウム半導体検出器

波高分析器

試料室

Ge半導体

液体窒素

エネルギーギャップが大きいと絶縁体となる。ゲルマニウム半導体は、このギャップが非常に小さい。そのため放射線により電離作用が起こると電流が流れる。

伝導帯

価電子帯

エネルギーギャップ

電子のエネルギー

Ge半導体は冷却しないと測定できない

25

---

---

---

---

---

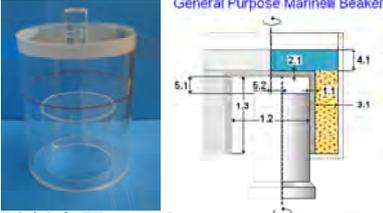
---

---

---

話題3 放射能の測定 26

放射線測定の種類

試料容器(マリネリ 0.7 L) 断面図

試料と検出器の空間的配置による  
 検出割合の変化を、検出効率が  
 高い定型の容器に充填することで  
 画一化

試料室を取り除いたイメージ  
 (青い部分はマリネリ容器)

---

---

---

---

---

---

---

---

話題3 放射能の測定 27

放射線測定の種類

試料室を開ける



試料を試料室にセット




---

---

---

---

---

---

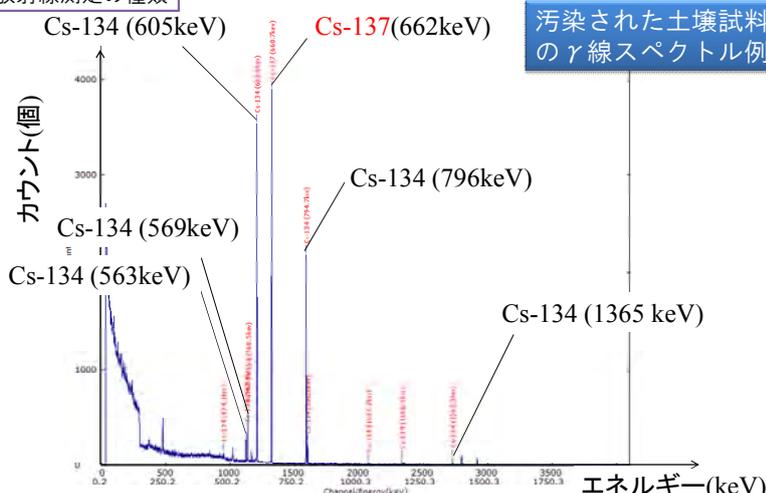
---

---

話題3 放射能の測定 28

放射線測定の種類

汚染された土壌試料のγ線スペクトル例




---

---

---

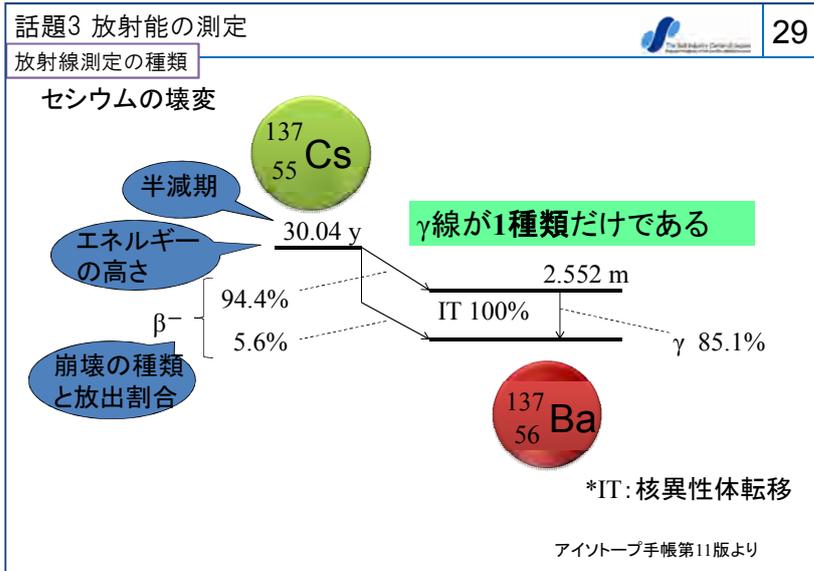
---

---

---

---

---




---

---

---

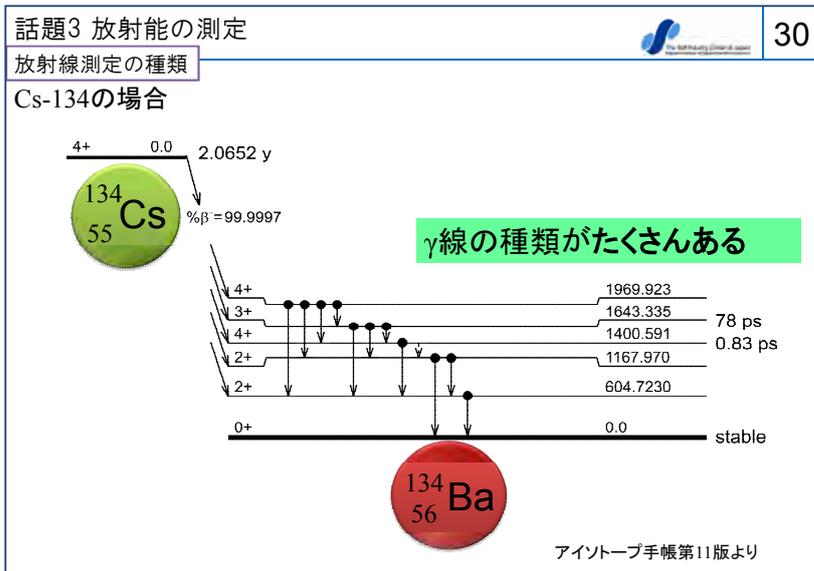
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---


31

## 話題4 放射線測定の実際

塩の放射能濃度測定

その他の方法, 装置

塩事業センターが販売している商品の調査


32

### 放射線測定の実際

塩の放射能濃度測定

放射能を測定するためには、試料ごとの特性に合わせる必要があります。

- ① 標準線源で校正 (機器の校正)
- ② 塩で測定 (標準試料の調製)
- ③ 再現性の確認

**塩試料の場合**

- ・タップして詰める
- ・塩の不純物からでるノイズを把握する



発泡スチロールでアルミナを抑えている

アルミナに放射性物質を吸着させている  
 (Cd-109, Co-57, Ce-139, Cr-51, Sr-85, **Cs-137**, Mn-54, Y-88, Co-60)



---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---


33

### 放射線測定の実際

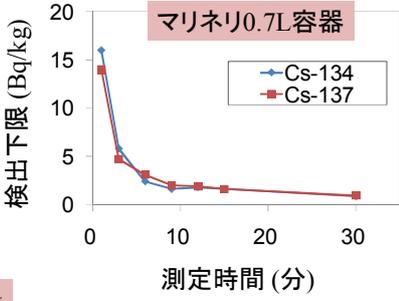
塩の放射能濃度測定

**マリネリ0.7L容器 : 塩1.2 kg**



**マリネリ2L容器 : 塩3 kg**

**U8容器 : 塩0.1 kg**



測定時間 (分)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
0	15	15
2	10	10
5	5	5
10	3	3
20	2	2
30	1.5	1.5

要求される検出下限を約1 Bq/kgとした場合、U8では2時間、マリネリ0.7L容器では30分間であった。マリネリ2Lでは、試料必要量が大きい

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

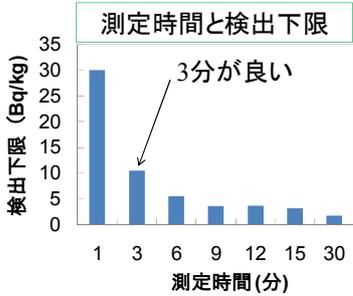
---

放射線測定の実際 34  
塩の放射能濃度測定

厚生労働省:食品中の放射性セシウムのスクリーニング測定法

必要条件

- ①検出下限25 Bq/kg以下
- ②50 Bq/kgの測定値の99%信頼性上限が100 Bq/kg



	Cs-134	Cs-137	総Cs
Run1	26.5	27.1	53.6
Run2	20.8	31.4	52.2
Run3	23.4	30.9	54.3
Run4	27.7	28.1	55.8
Run5	19.2	29.1	48.3
平均			52.8
σ			2.9

平均値 + 3.747σ < 100 Bq/kg

十分にスクリーニング法の要件を満たしていた。

話題3 放射能の測定 35  
塩の放射能濃度測定

測定コード	M120121029150504	試料コード	M120121029150504
<b>試料情報</b> 試料区分 其他 採取開始 2011年04月27日 12時00分 採取終了 2011年06月27日 12時00分 試料容器 マリネリ7L容器 供試料量 1.00E+00 kg 回収率 100.00 % 充填高さ 10.00 cm 密度 1.200 g/cm3		地域 - 緯度・経度 - 試料コメント 核種分析 目的 其他 部位 - 密封 塩化カリウム 元素組成式 - AMP比 100.00 %	
<b>測定情報</b> 検出器番号 No. 1 測定開始 2012年10月30日 14時58分 測定時間 LT 1800 秒 RT 1800 秒		測定位置 密着 測定者 測定コメント SSSS2012用テスト試料	
<b>付加情報</b>			
<b>分析条件</b> 核データ セシウム+K B/G補正 する(結果利用) BG1 M120120412193758 BG2		減衰補正 採取終了~測定開始、測定中の補正 エネルギー校正 E120110816133916 効率校正 MARL700ML(EQG)	

No	核種名	エネルギー (keV)	半減期	放射能濃度 (Bq/kg)	荷量平均放射能濃度 (Bq/kg)	検出限界値 (Bq/kg)	マーク
1	I-131	284.30	8.04E+00 D	N D		3.978E+19	
2	I-131	364.48	8.04E+00 D	N D		3.481E+18	
3	Cs-134	563.23	2.06E+00 Y	3.042E-01 ± 6.638E+00	2.712E-01 ± 1.073E+00	2.519E-01	
4	Cs-134	569.32	2.06E+00 Y	2.724E-01 ± 4.219E+00	2.712E-01 ± 1.073E+00	1.405E-01	
5	Cs-134	604.70	2.06E+00 Y	2.689E-01 ± 1.523E+00	2.712E-01 ± 1.073E+00	1.805E+00	
6	I-131	636.97	8.04E+00 D	N D		3.946E+19	
7	Cs-137	661.66	3.00E+01 Y	3.192E-01 ± 1.422E+00	3.192E-01 ± 1.422E+00	1.212E+00	
8	Cs-134	795.85	2.06E+00 Y	2.704E-01 ± 1.722E+00	2.712E-01 ± 1.073E+00	1.438E+00	
9	Cs-134	801.93	2.06E+00 Y	2.936E-01 ± 6.926E+00	2.712E-01 ± 1.073E+00	1.789E+01	
10	Cs-134	1365.15	2.06E+00 Y	N D		4.957E+01	C

放射線測定の実際 36  
その他の方法、装置

β線の測定 = 表面汚染測定

当研究所では、表面の放射能汚染を検出するために表面汚染測定器を使用している。

- γ線サーベイメーター → 汚染源を探す
- β線サーベイメーター → 対象の汚染が無いかを探す



富士電機製 表面汚染測定計 NHJ2

放射線測定の実際 37

塩事業センターが販売している商品の調査



現在、製造している工場  
 海水を原料とする5工場と天日塩を原料とする1工場

神奈川県、兵庫県、岡山県、香川県、徳島県、長崎県

---

---

---

---

---

---

---

---

放射線測定の実際 38

塩事業センターが販売している商品の調査

現在の製造工場 (海水5工場、天日塩1工場)  
 神奈川県、兵庫県、岡山県、香川県、徳島県、長崎県  
 原料である各地の海水(天日塩)と製品を毎月チェックしている。




---

---

---

---

---

---

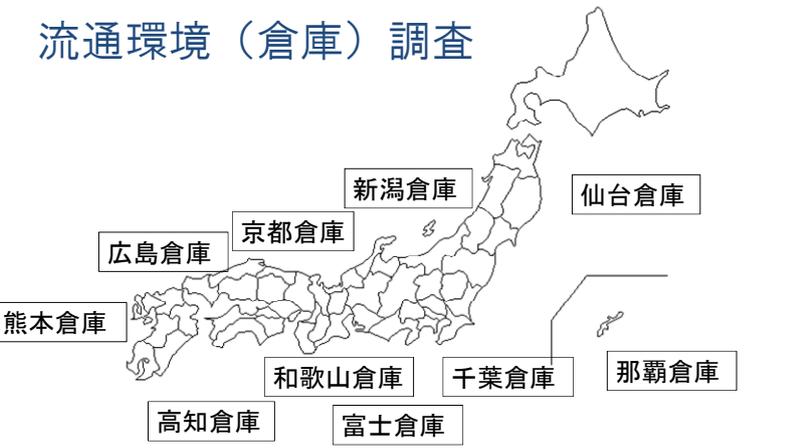
---

---

放射線測定の実際 39

塩事業センターが販売している商品の調査

流通環境 (倉庫) 調査




---

---

---

---

---

---

---

---

放射線測定の実際 40

塩事業センターが販売している商品の調査

**試料の採取・現地測定**

空間線量 (γ線測定)

大気(γ線測定)

JIS指定 ヨウ素サンプラー

製品検査 (表面汚染測定)

---

---

---

---

---

---

---

---

放射線測定の実際 41

塩事業センターが販売している商品の調査

**倉庫調査結果—大気・製品—**

	大気 (5m <sup>3</sup> 中)	空間線量 (μSv/hr)	製品の表面汚染 (Bq/cm <sup>2</sup> )
仙台	不検出	0.08~0.09	<0.4
新潟	不検出	0.07~0.08	<0.4
千葉	不検出	0.09~0.10	<0.4
富士	不検出	0.09	<0.4
京都	不検出	0.07	<0.4
和歌山	不検出	0.09	<0.4
広島	不検出	0.10	<0.4
高知	不検出	0.07~0.08	<0.4
熊本	不検出	0.07~0.08	<0.4
那覇	不検出	0.06	<0.4

---

---

---

---

---

---

---

---

今後について 42

海水総合研究所の放射能測定におけるこれまでの対応

- ・原料となる海水等の調査
- ・製品の測定
- ・塩の倉庫調査
- ・塩の放射能測定の受託分析

・地域貢献: 研究所の近隣である神奈川県西部の団体からの  
依頼測定・調査・機器の貸出

今後の対応  
 海水中の放射性物質は希釈され減少すると予測されている。放射性物質も他の環境汚染物質と同様に、今後も調査を継続し、安全を確認する必要がある。

今後も食用塩の安全を確保するために調査を継続していく

## Memo