

母なる海の恵み ～海水からのものづくり～

Contents

1. 逆浸透法による海水淡水化の現状と展望
一般財団法人造水促進センター 専務理事 大熊 那夫紀
2. イオン交換膜法製塩工場における有価資源回収の現状
ナイカイ塩業株式会社 研究開発部 部長代理 小林 秀嗣
3. イオン交換膜法製塩の技術を活用した海水総合利用プロセスの検討
公益財団法人 塩事業センター 海水総合研究所 主任研究員 加留部 智彦

協賛：化学工学会，環境資源工学会，軽金属学会，JDA協会，塩元売協同組合，
資源・素材学会，全国輸入塩協会，造水促進センター，
ソルト・サイエンス研究財団，たばこと塩の博物館，日本海水学会，
日本海洋学会，日本塩工業会，日本特殊製法塩協会，日本粉体工業技術協会，
日本膜学会，日本マグネシウム協会，日本水環境学会，粉体工学会，分離技術会
(敬称略)

2023年12月7日(木)

逆浸透法による海水淡水化の 現状と展望



2023年12月7日
(一財) 造水促進センター
専務理事 大熊 那夫紀



1. 造水センターとは

2. 世界の水環境と海水淡水化技術について

3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発

4. 世界の海水淡水化の動向

5. 日本の海水淡水化の状況

6. 海水淡水化技術の課題と展望

1973年 通商産業省(現 経済産業省)の外郭団体として発足
2010年 **一般財団法人** 造水促進センターに移行

理事長 山本和夫(東京大学 名誉教授、タイAIT学長)

■ 設立目的

水不足と環境保全に資するため、下水・廃水の再生利用、海水の淡水化などを
新しい水資源ととらえた「造水」に関する技術の開発・実用化及び
その**普及**を図り、もって我が国経済の発展と生活福祉の向上に寄与する。

■ 会員【82団体(2023年10月)】

・自治体会員:28団体

東京都、大阪府、福岡県、名古屋市、横浜市他

・工業用水利用者団体:8団体

日本工業用水協会、石油連盟、日本産業機械工業会他

・企業会員:46社

水関連企業(水エンジン会社、機器メーカー、素材メーカー、水コンサル)
金融機関、損害保険

造水技術 (Zosui Technologies)



非在来水源の活用
(海水淡水化、
下水・排水の再利用等)

<事業概要>

■ 造水技術の調査開発

- ・ 海水淡水化
- ・ 下水の再利用
- ・ 排水の再利用
- ・ 水使用合理化

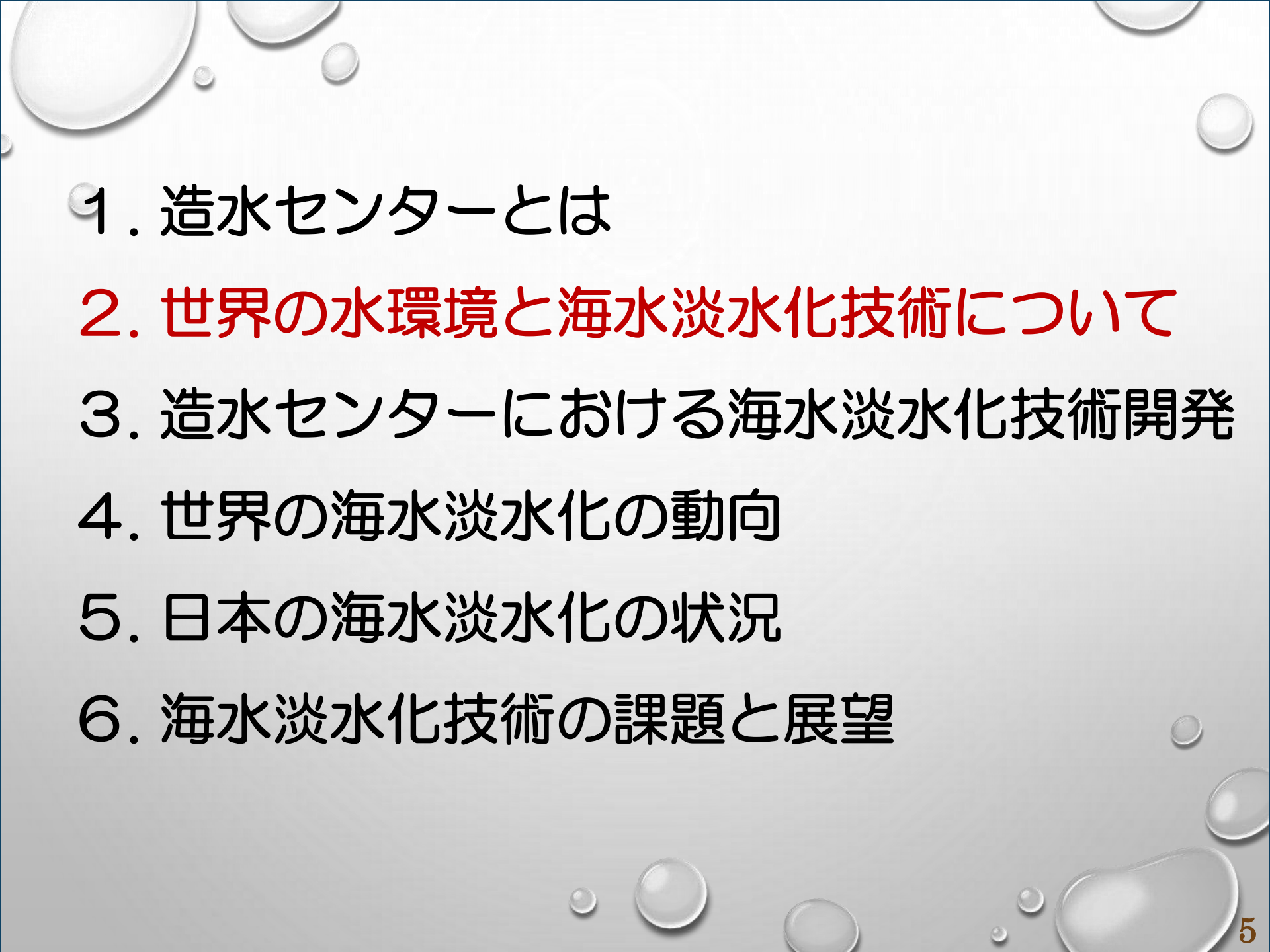
■ 造水技術の普及促進

- ・ 研修事業、国内外セミナー
- ・ 水再利用の国際標準化

■ 地下水関連 2団体の事務局



国内外の
水環境・
インフラ事業
に貢献

- 
1. 造水センターとは
 2. 世界の水環境と海水淡水化技術について
 3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発
 4. 世界の海水淡水化の動向
 5. 日本の海水淡水化の状況
 6. 海水淡水化技術の課題と展望

2.1 水資源の確保

水ストレス: 水賦存量に対する取水量の割合

＜取水量が水賦存量の2割を超えると水ストレス状態＞

Freshwater stress



1995



2025

water withdrawal as percentage of total available



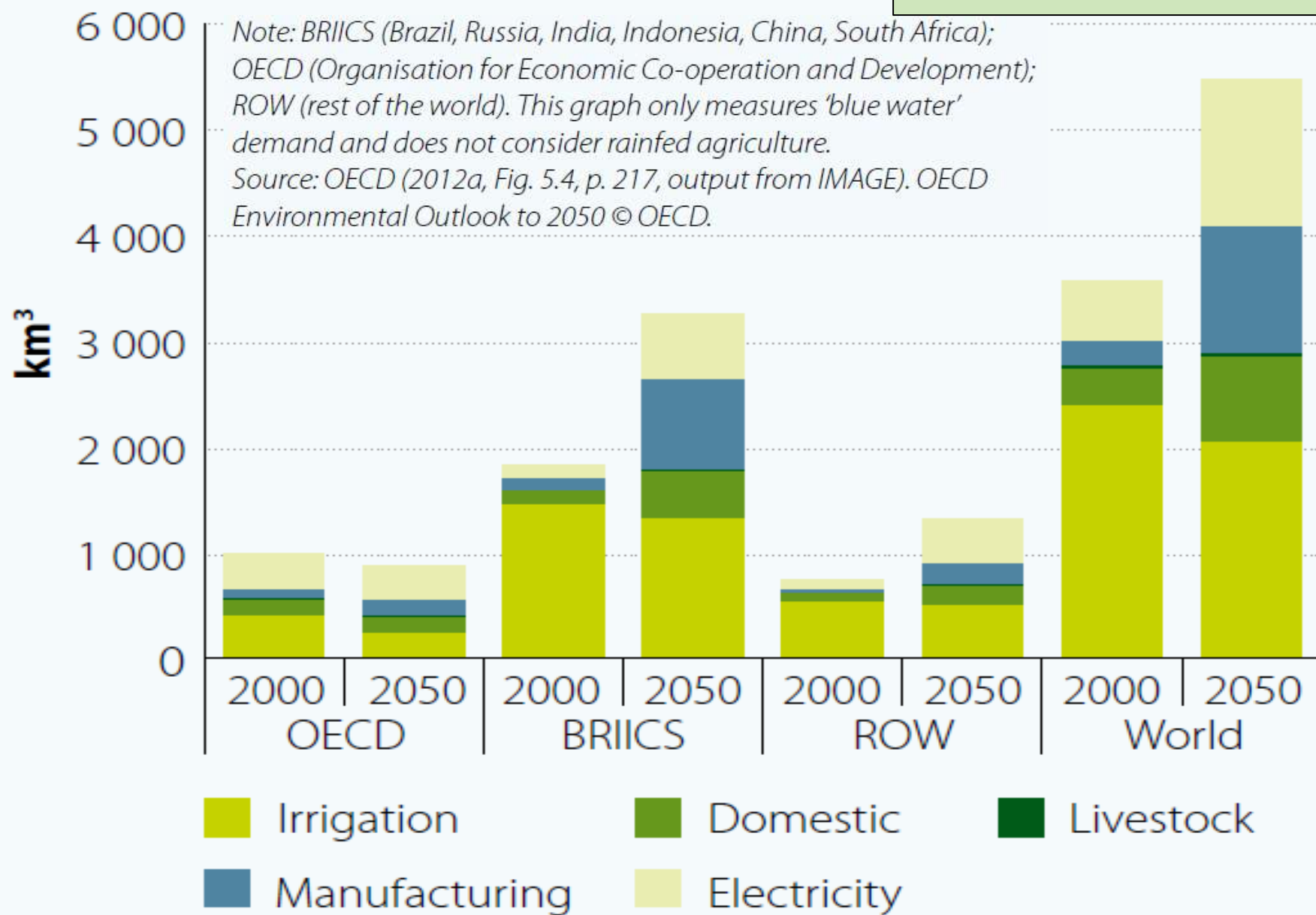
GRID
Arendal UNEP

GRAPHIC DESIGN: PHILIPPE BEKACENICZ

Source: Global environment outlook 2000 (GEO), UNEP, Earthscan, London, 1999.

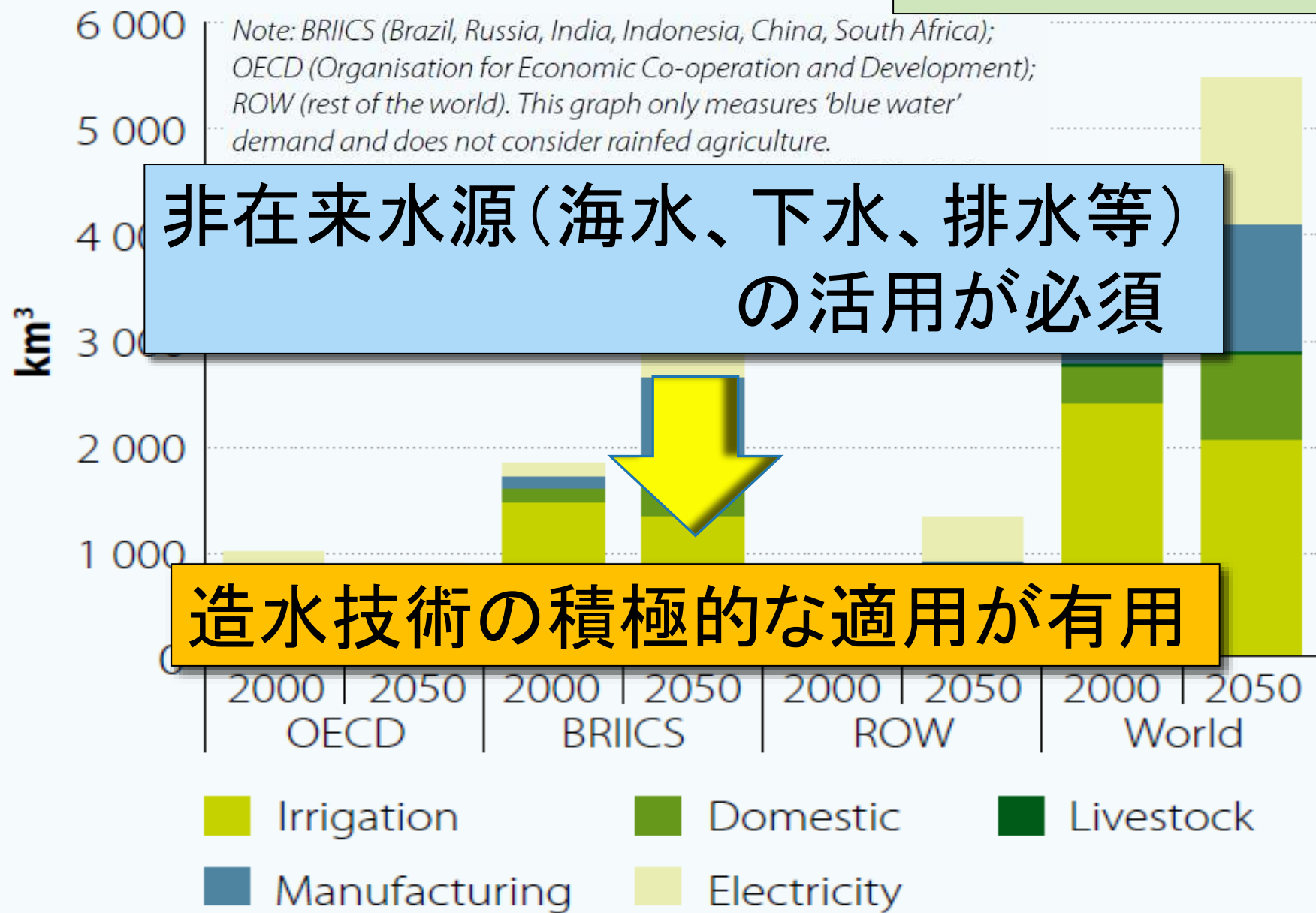
2.2 水資源の需要予測

世界の用途別水需要

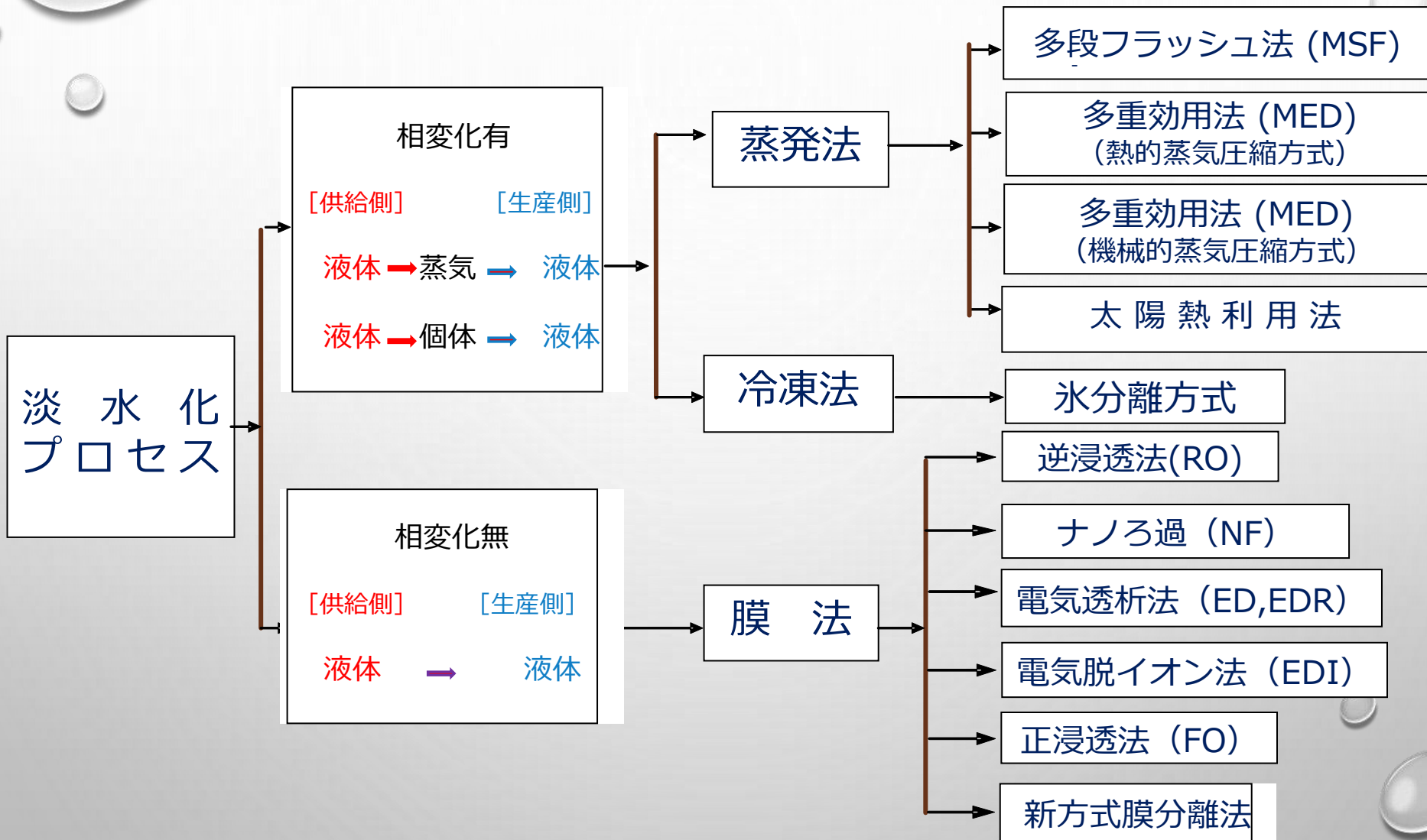


2.2 水資源の需要予測

世界の用途別水需要



2.3 脱塩技術の分類



2.3 脱塩技術の分類－蒸発法－

日本企業がサウジアラビア・アルジュベイルに建設したMSFプラント

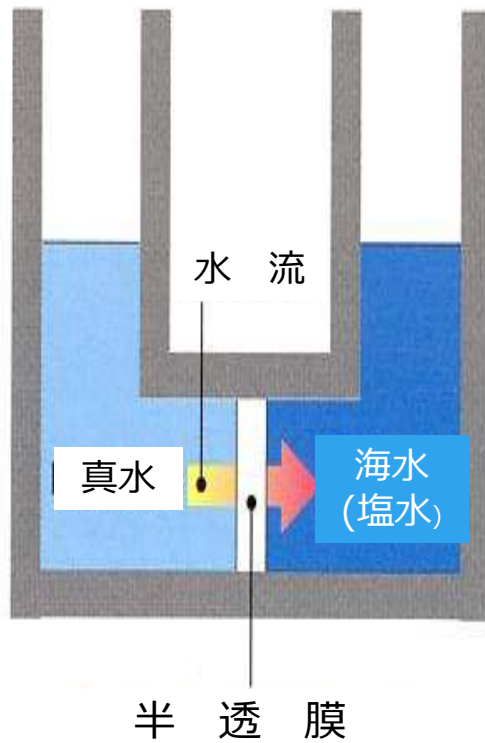


46 units, 全容量 百万 m^3/d

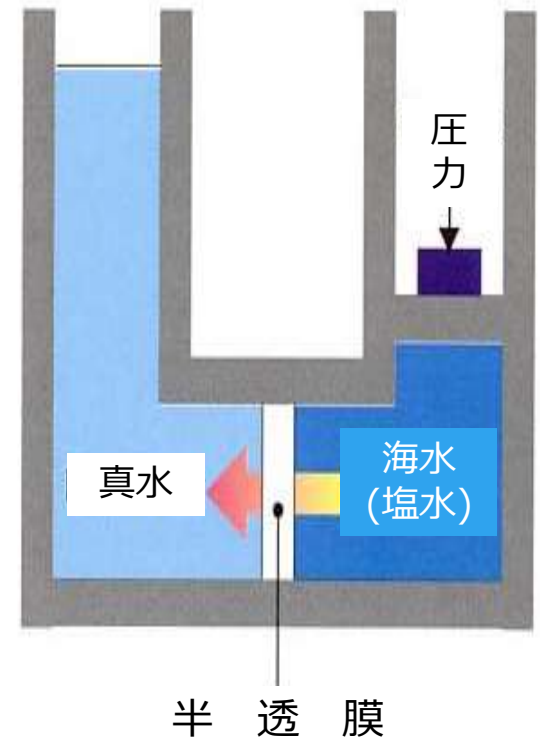
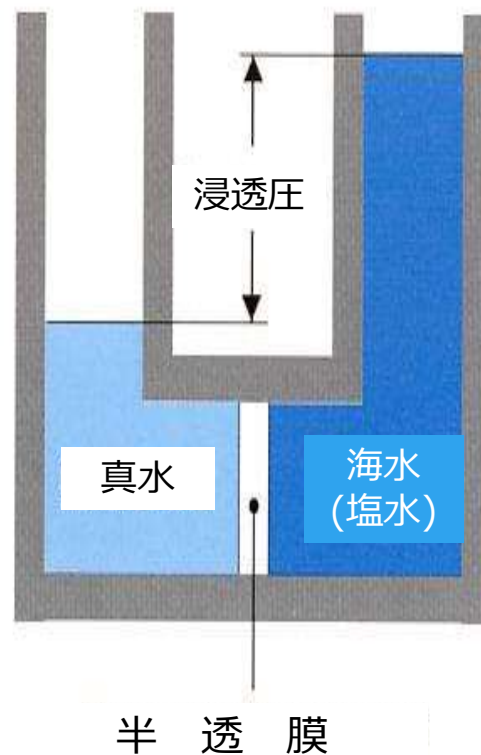
2.3 脱塩技術の分類—逆浸透法—

逆浸透（RO）法の原理・現象

浸 透 現 象

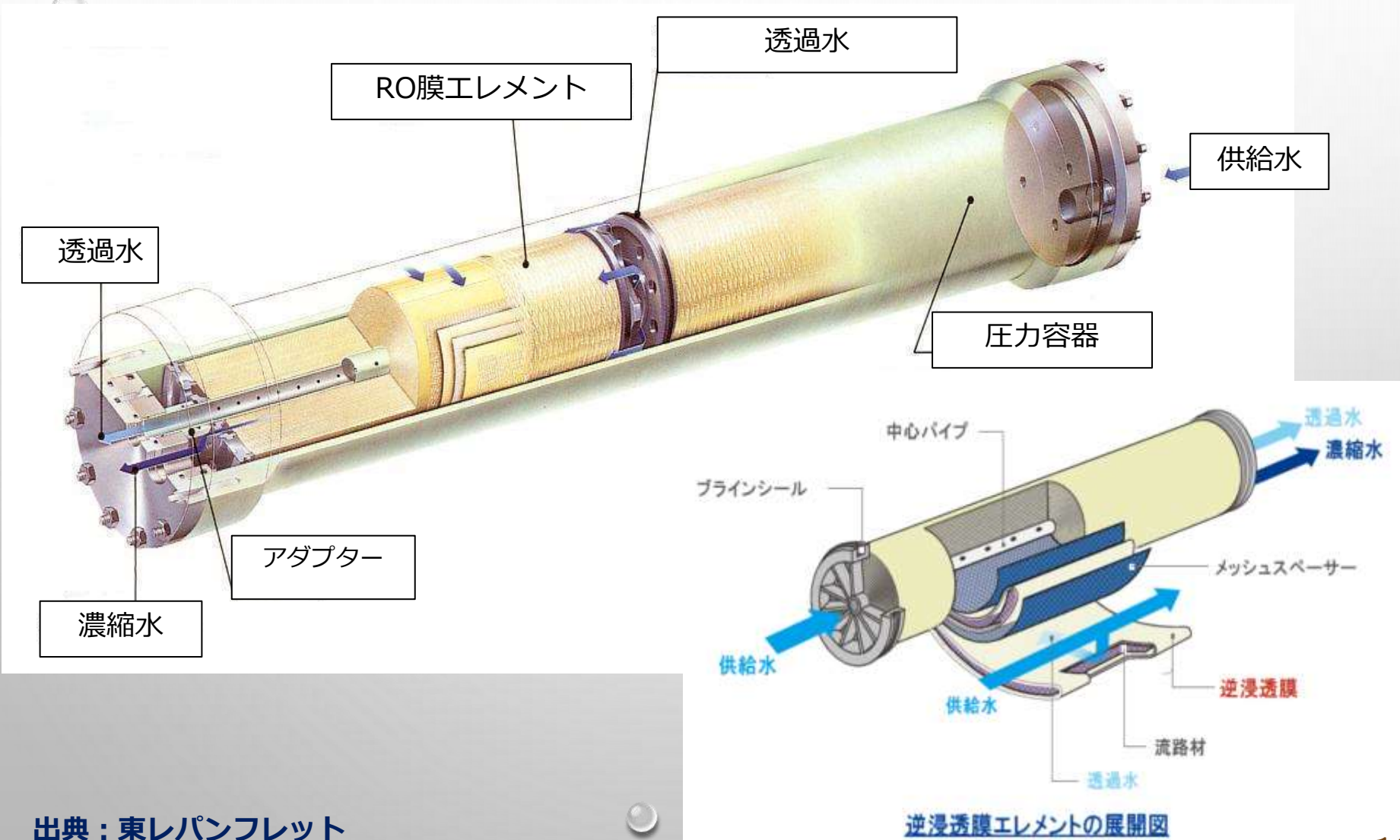


逆 浸 透 現 象



2.3 脱塩技術の分類ー逆浸透法ー

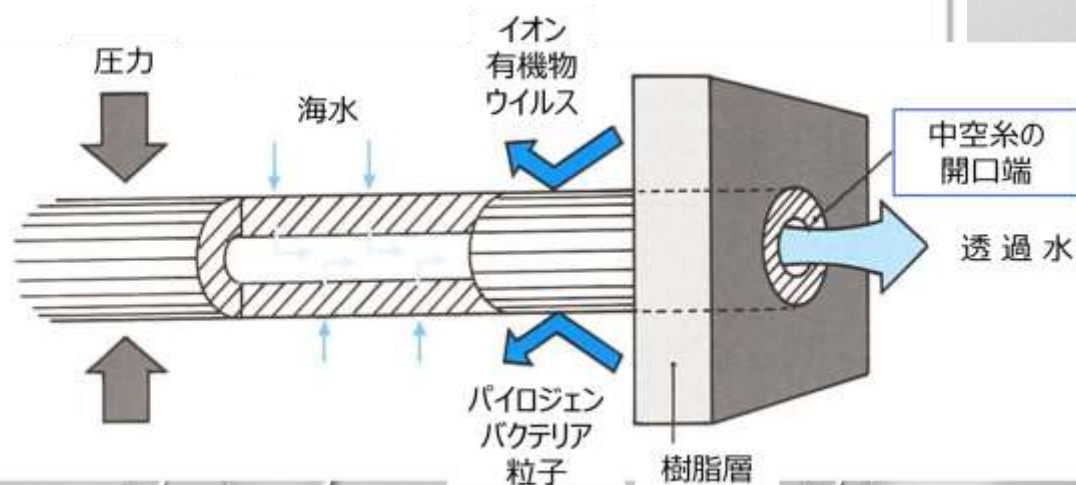
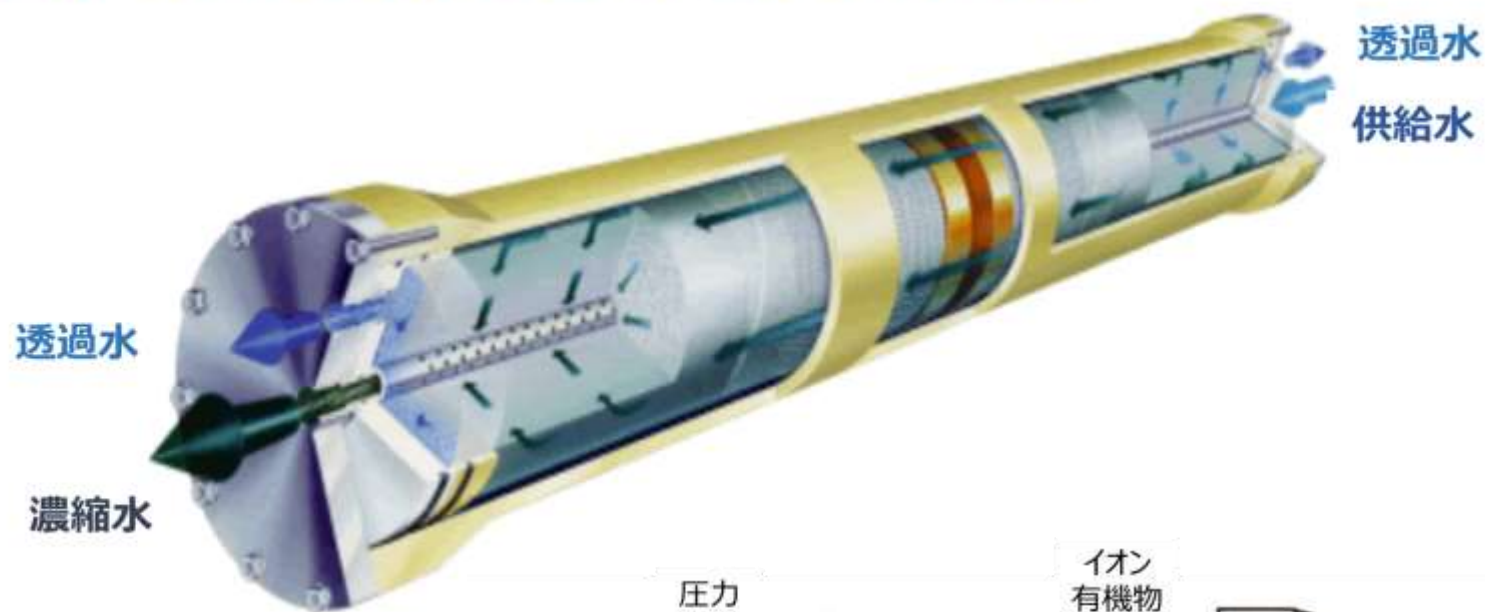
スパイラル型RO膜モジュールの構造



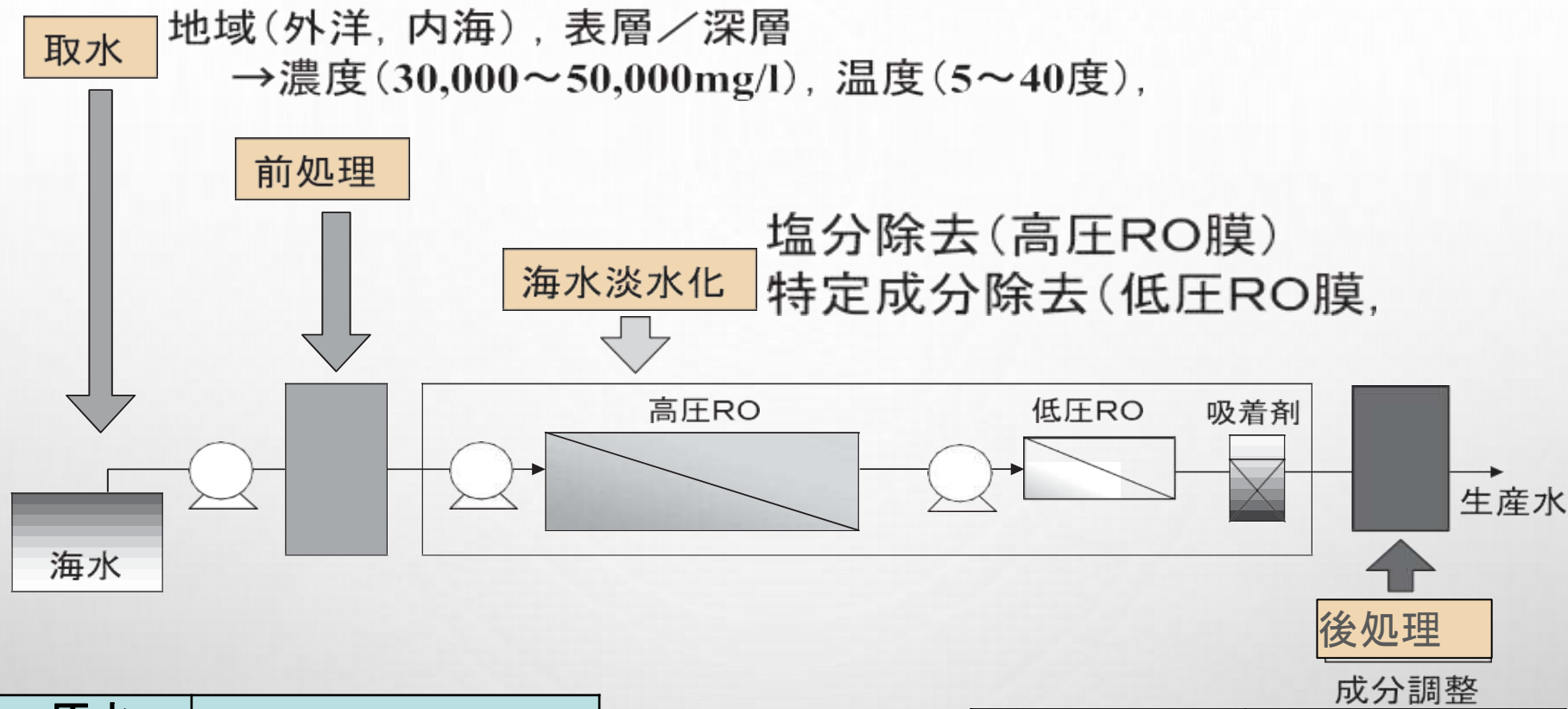
2.3 脱塩技術の分類ー逆浸透法ー

中空糸型RO膜モジュールの構造

HOLLOSEP®ダブルエレメントのモジュール構造図 (HM シリーズ)



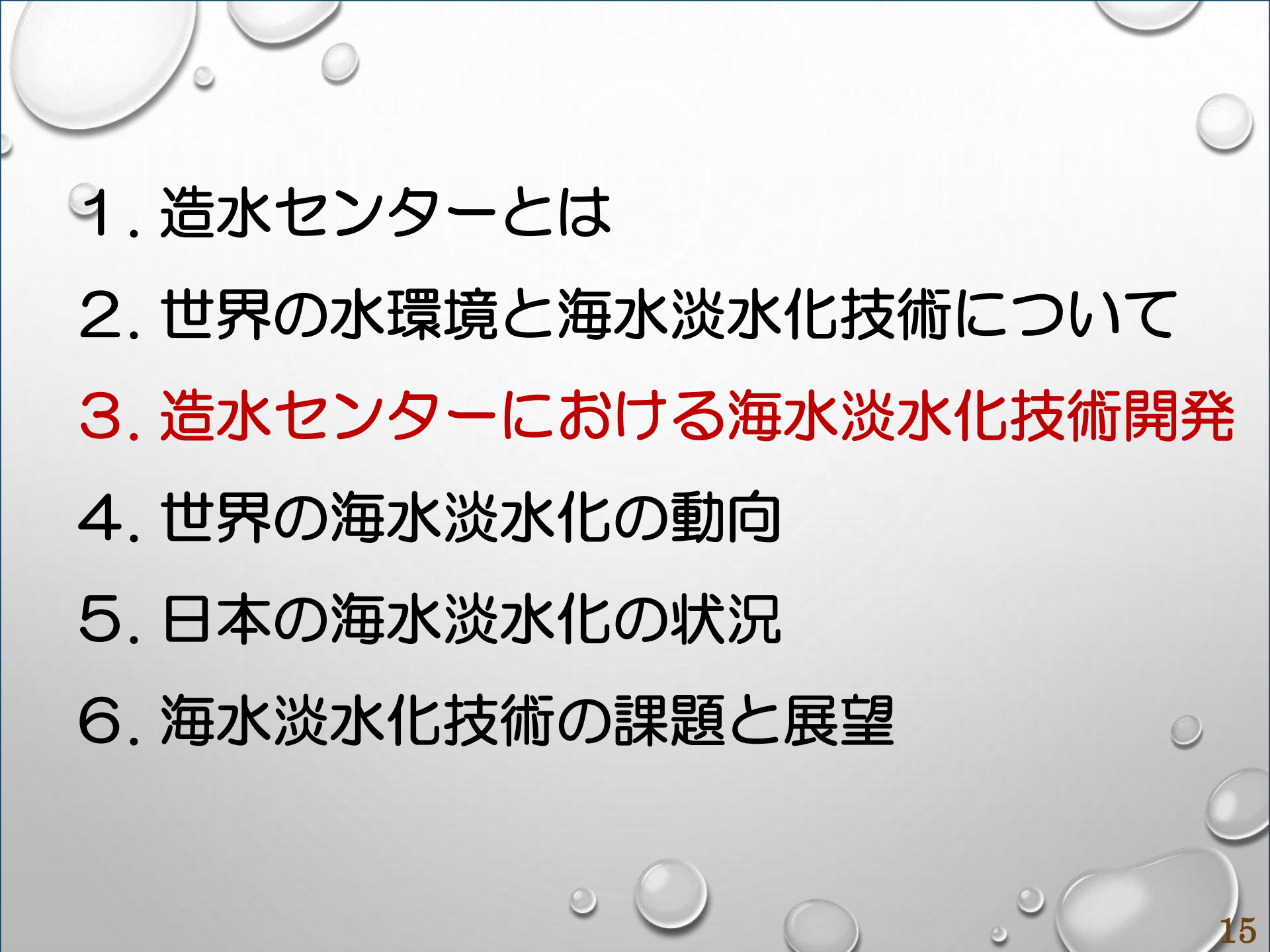
2.4 海水淡水化のフローと水質



原水 (海水)	水質
TDS	34,000~47,000mg/L
ホウ素	0.1~9mg/L
TSS	(様々)
濁度	(様々)

収率約40%
(RO一段)

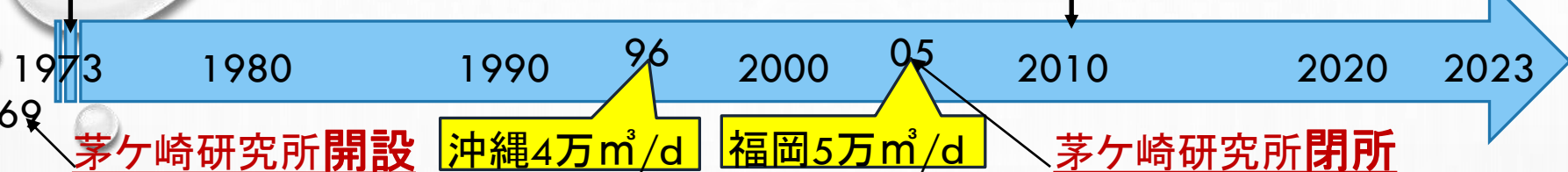
製品(飲料用)	WHO基準
TDS	<500mg/L
ホウ素	<1mg/L
TSS	<1mg/L
濁度	<5NTU

- 
1. 造水センターとは
 2. 世界の水環境と海水淡水化技術について
 3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発
 4. 世界の海水淡水化の動向
 5. 日本の海水淡水化の状況
 6. 海水淡水化技術の課題と展望

3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

(一財)造水促進センターに移行



1974年: 省エネルギー型RO法海水淡水化技術開発

1976年: 国産RO膜の適用

1979年: 海水淡水化前処理技術

1980年: LNG利用海水淡水化技術

1981年: 一段脱塩RO法技術

1985年: 透過気化法海水淡水化技術

1996年: ホウ素除去技術

1999年: 高回収率RO法海水淡水化技術

2001年~: 中東向けRO法海水淡水化技術(オマーン、カタール)

2006年~: トリハイブリッド型海水淡水化技術開発(SWCC共研)

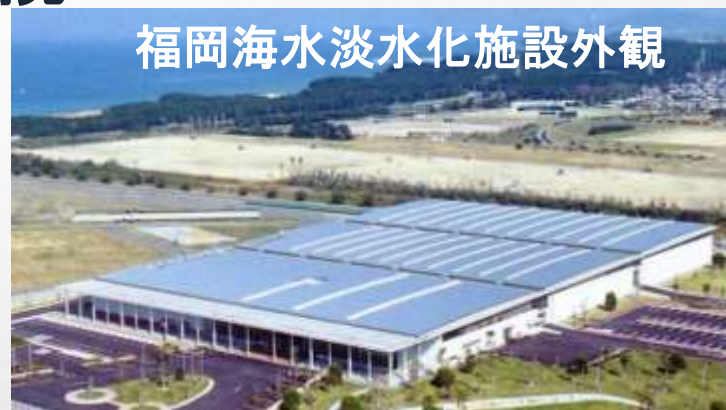
2014年: 海水淡水化新技術の適合性評価(エネルギー回収装置)

2014年~: ODA海水淡水化整備調査・案件形成調査

(セネガル、インド、南部アフリカ、イラク、チュニジア等)

2017年~: 大型海水淡水化更新調査

2021年~: 海外海水淡水化設備の設計支援



福岡海水淡水化施設外観

基礎
技術開発

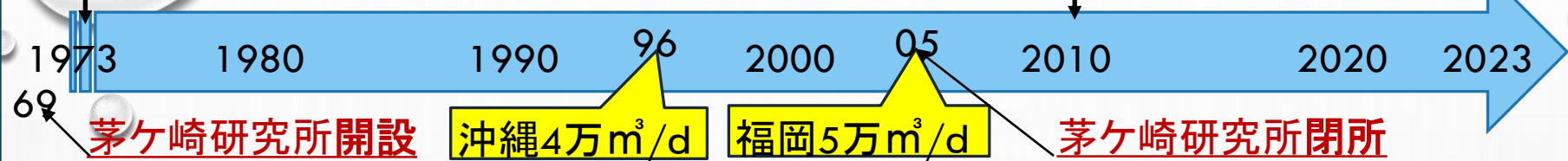
海外共同研究

海外案件形成

3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

(一財)造水促進センターに移行



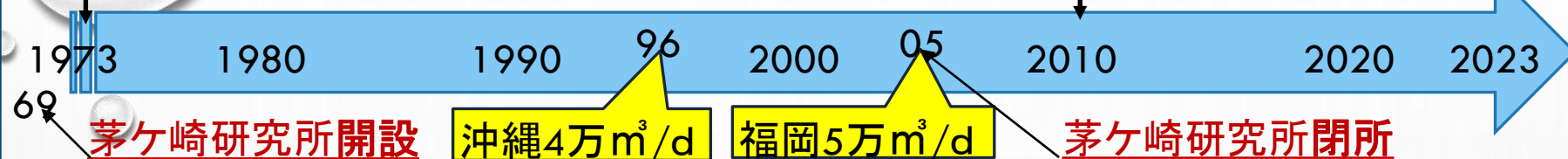
【茅ヶ崎研究所外観(1969年)】



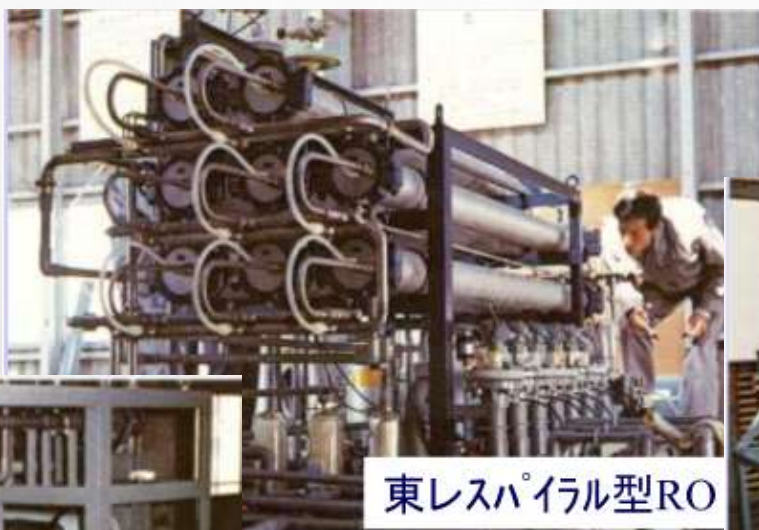
3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

(一財)造水促進センターに移行



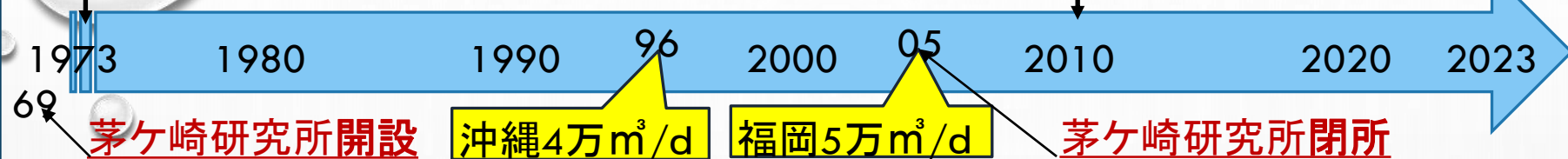
【国産RO膜モジュール(1976年)】



3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

(一財)造水促進センターに移行



【茅ヶ崎実証プラント800m³/d(1979年)】



3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

(一財)造水促進センターに移行



【オマーン：石油精製用海水淡水化(2001年)】



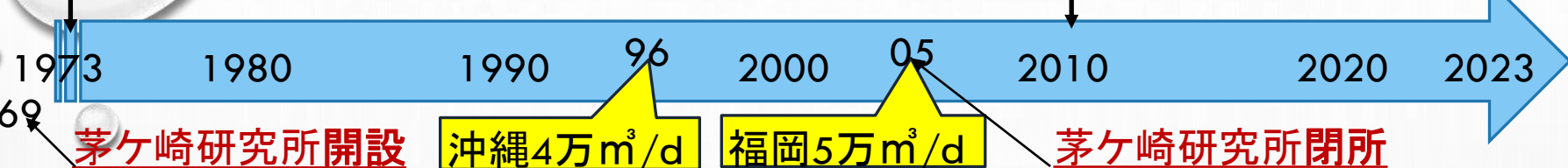
【カタール：中東向け海水淡水化(2003年)】



3. 造水センターの海水淡水化関連事業

(財)造水促進センター設立

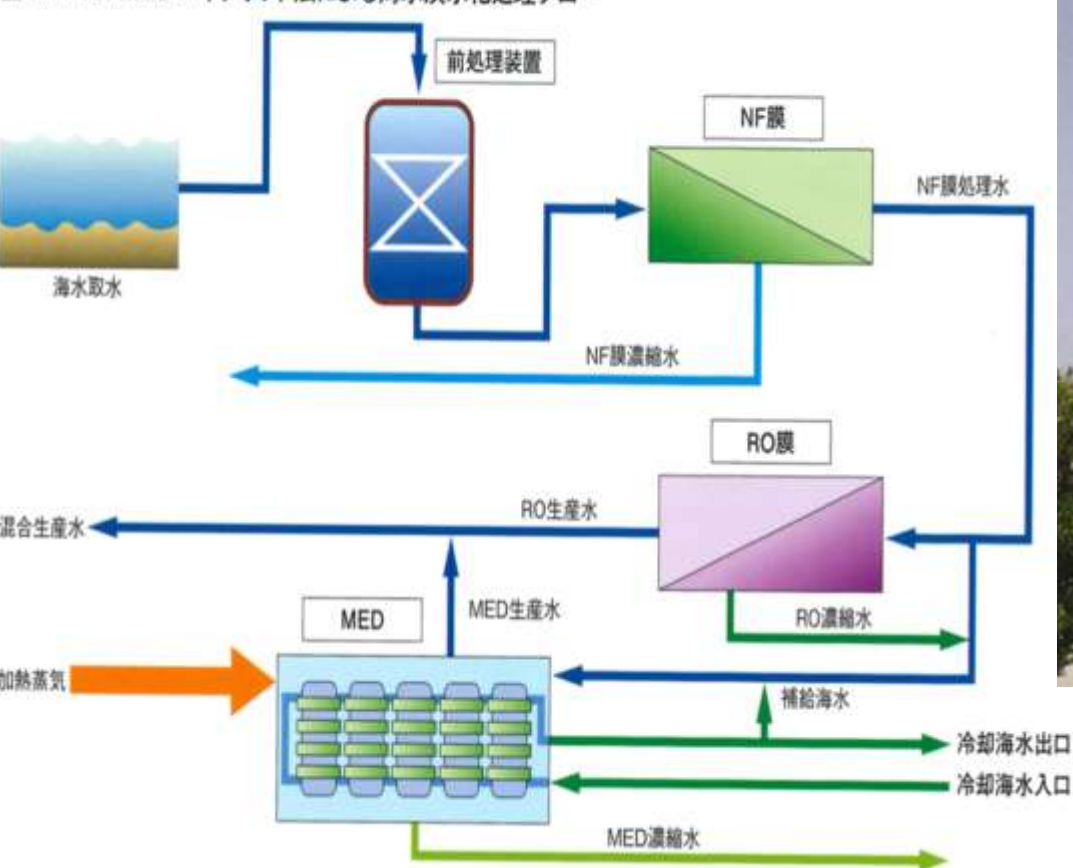
(一財)造水促進センターに移行



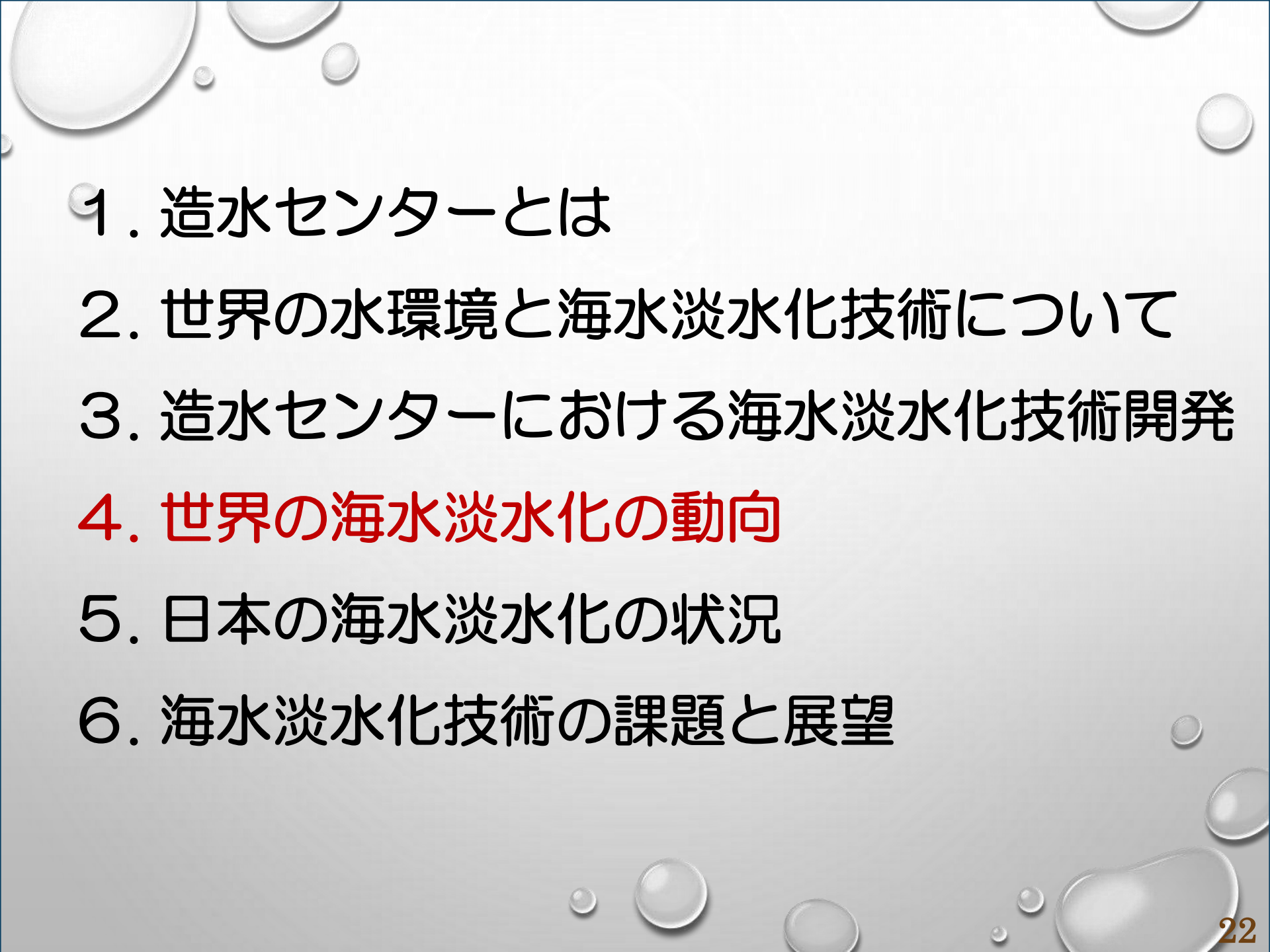
【トリハイブリッド型海水淡水化システムの開発(2006年)】
サウジアラビア・ササクラ・造水促進センターの共同事業

共同特許取得

■NF/RO/MEDハイブリッド法による海水淡水化処理フロー

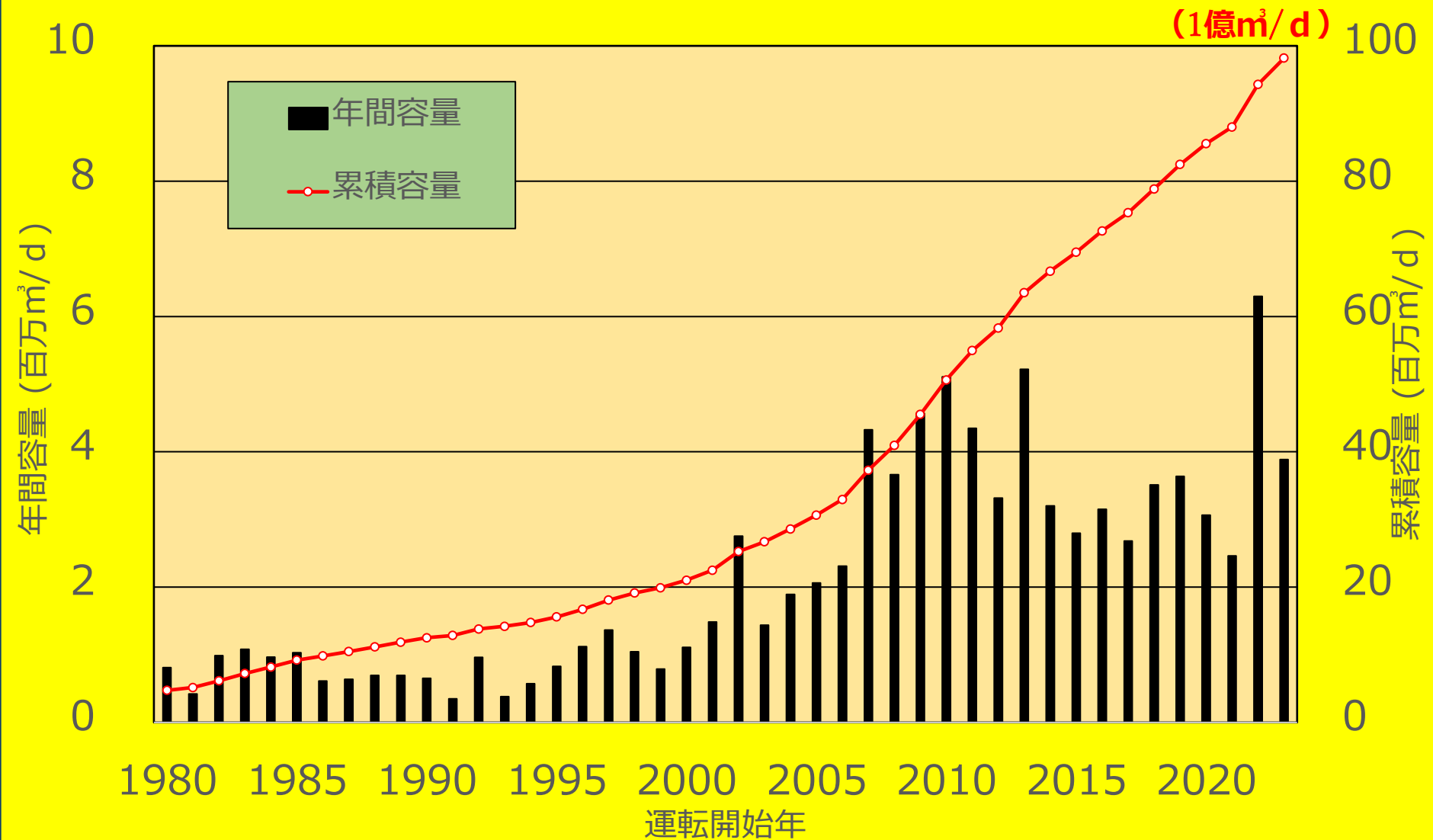


実証プラント 24m³/d

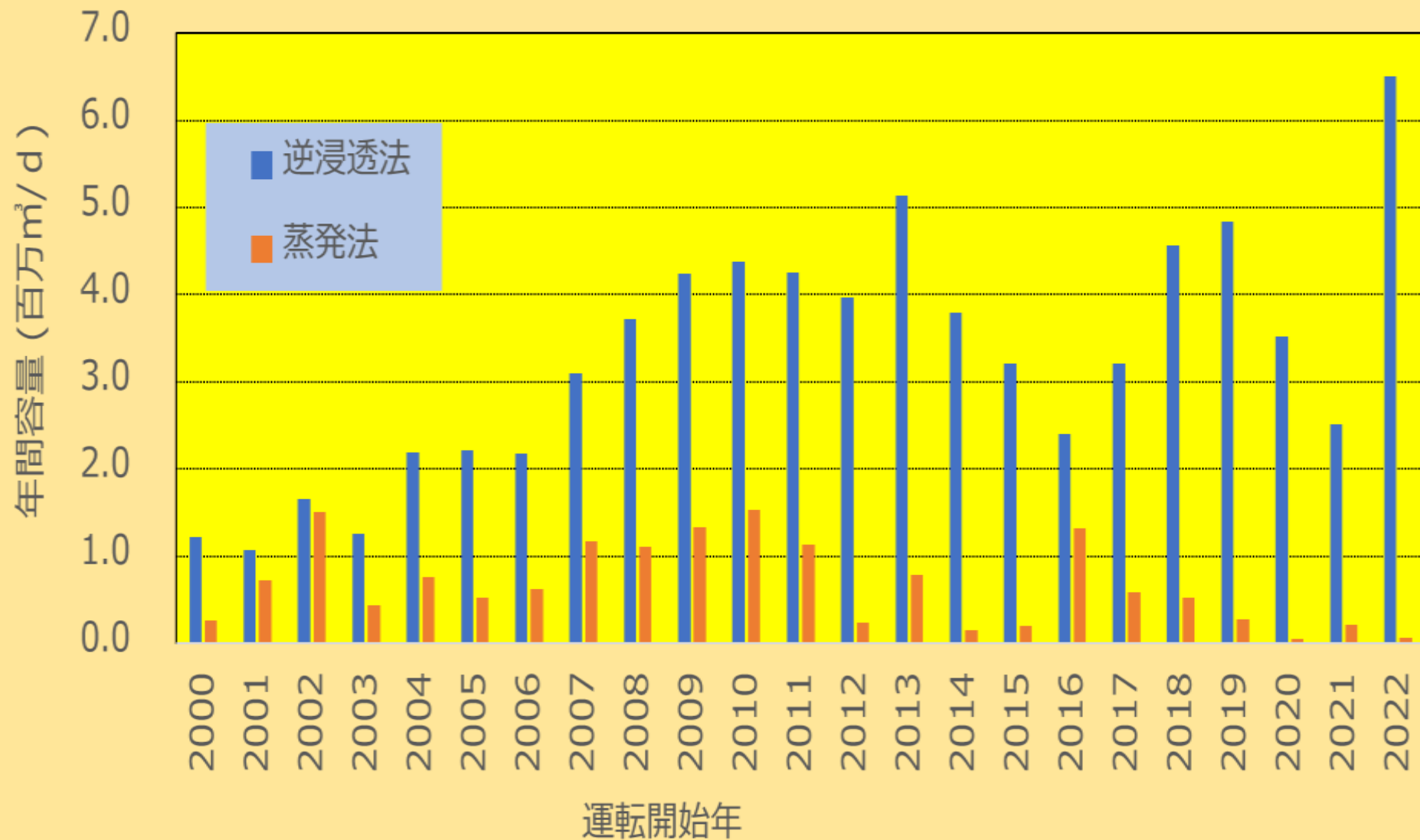
- 
1. 造水センターとは
 2. 世界の水環境と海水淡水化技術について
 3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発
 4. 世界の海水淡水化の動向
 5. 日本の海水淡水化の状況
 6. 海水淡水化技術の課題と展望

4.1 世界における脱塩プラント(SW+BW)の処理量推移

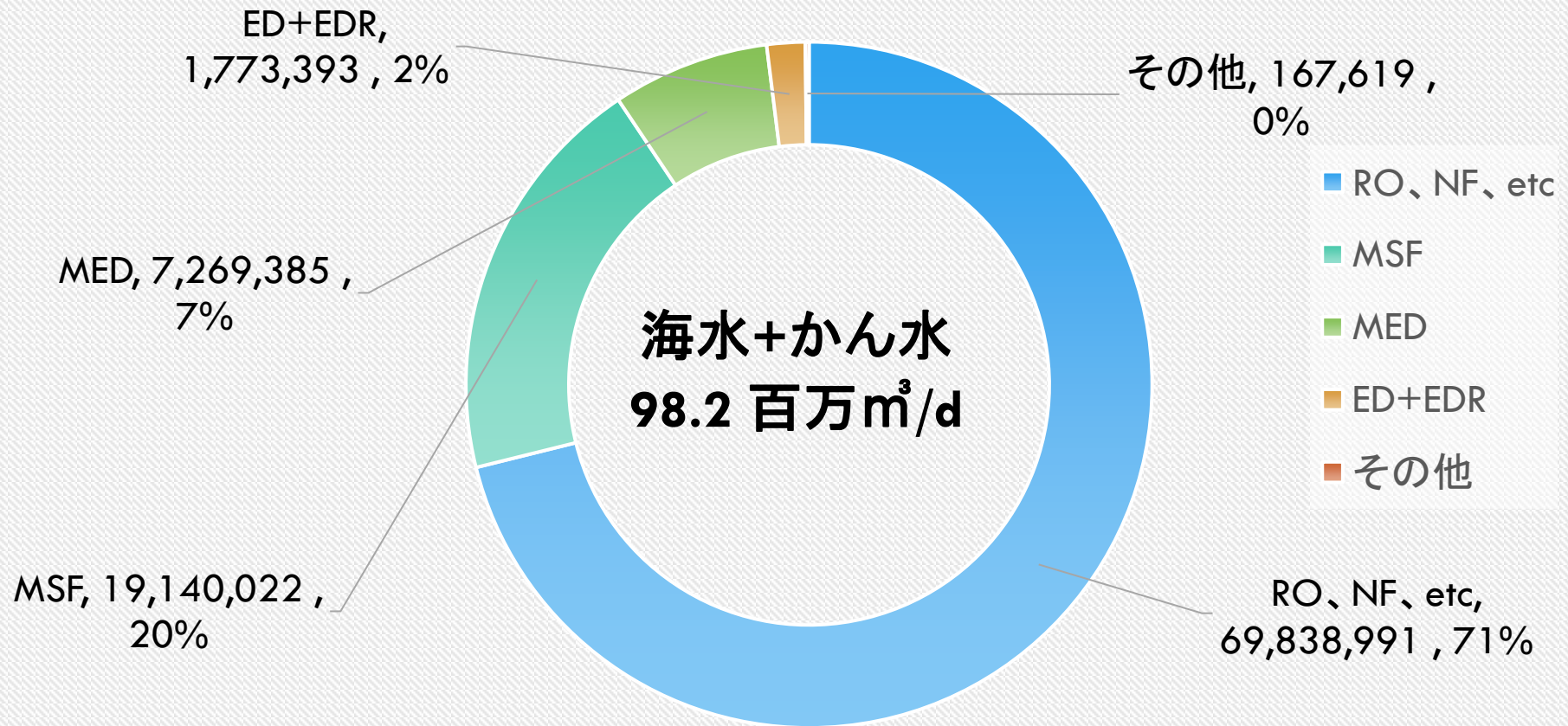
SW:海水 BW:かん水



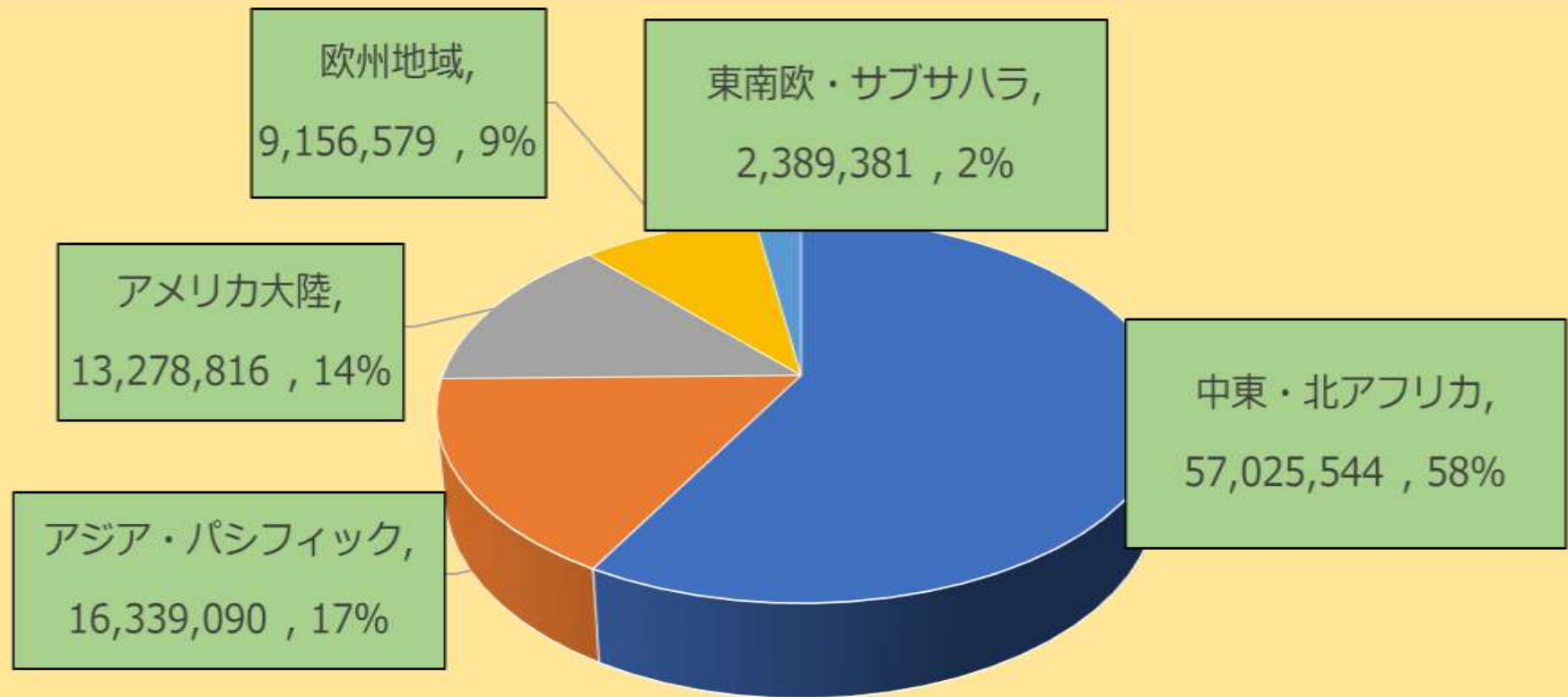
4.2 主要な方式別の年別納入容量（逆浸透法と蒸発法）



4.3 脱塩プラントの方式別割合(原水：海水、かん水)



4.4 脱塩プラントの地域別割合（原水：海水、かん水）



アメリカ大陸 : Latin America / Caribbean / North America
アジア・パシフィック East Asia / Pacific / Southern Asia
東南欧・サブサハラ Eastern Europe / Central Asia / Sub-Saharan Africa
欧州地域 Eastern Europe / Central Asia / Western Europe
中東・北アフリカ Middle East / North Africa

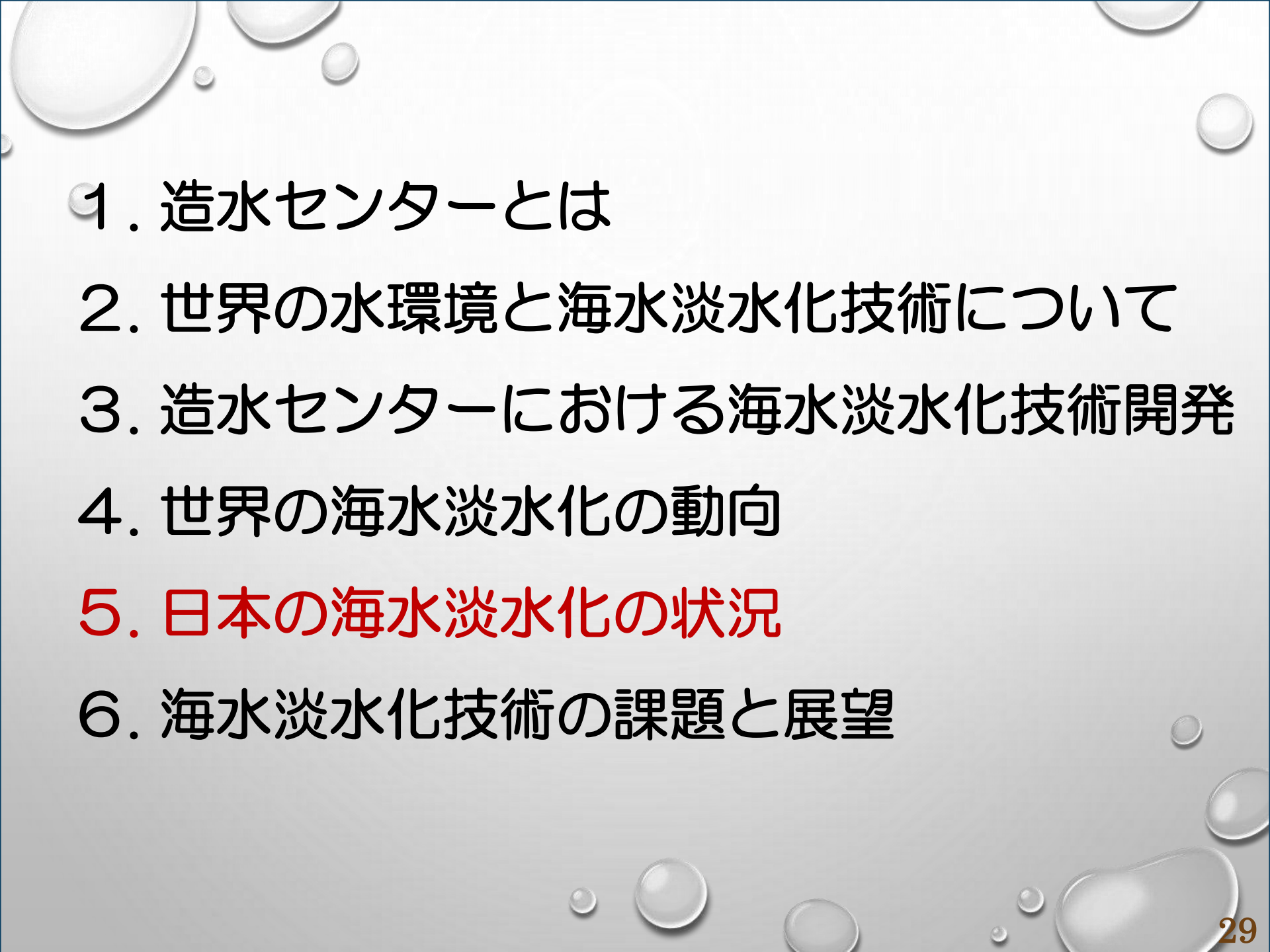
容量単位 : (m³/d)

4.5 世界の大型脱塩施設(TOP20)

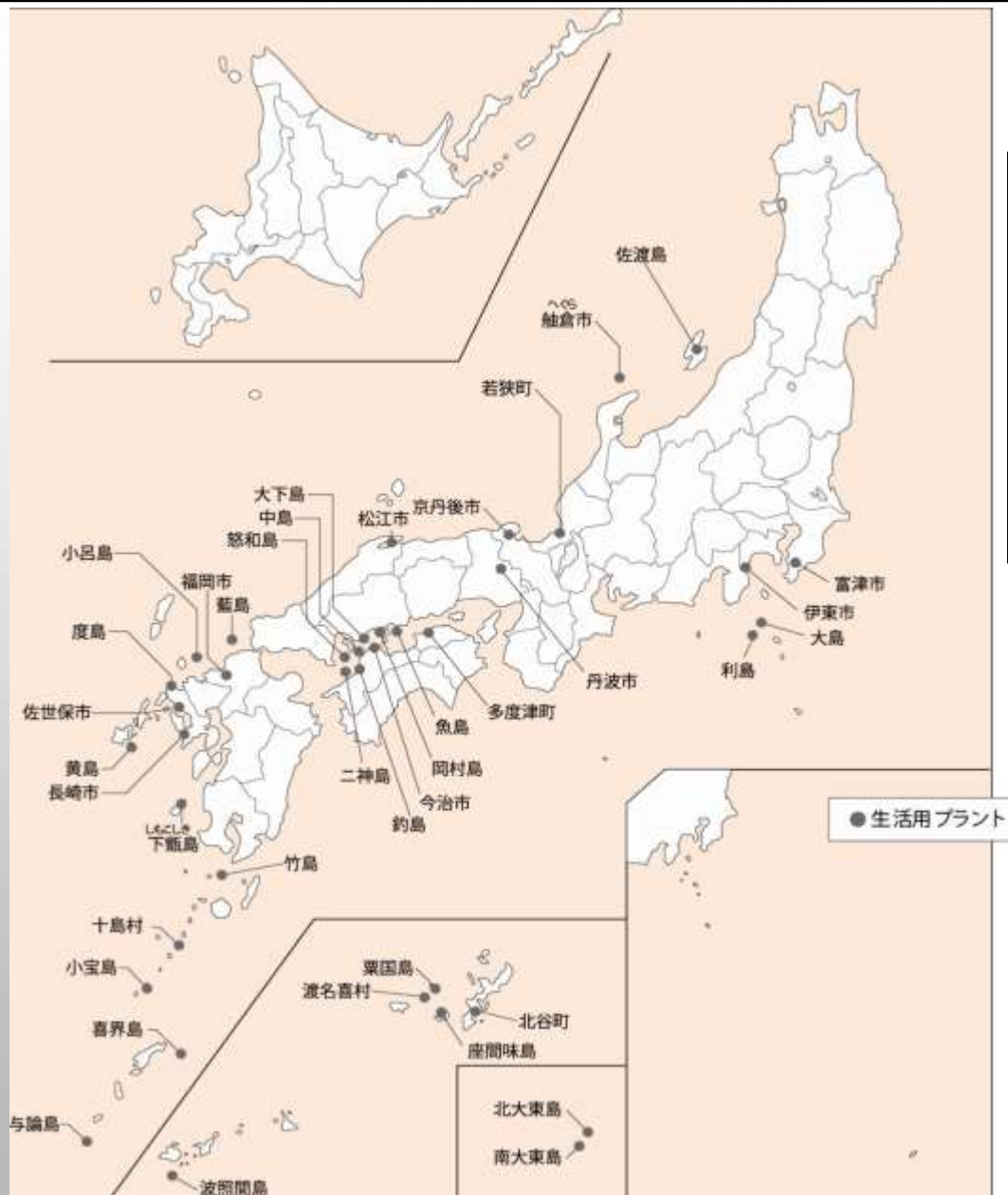
No	運転開始年	国名	容量 (m ³ /d)	方式	原水	プロジェクト名
1	2022	United Arab Emirates	909,000	RO	Seawater	Taweelah IWP
2	2009	Saudi Arabia	880,000	MSF	Seawater	Shoaiba 3
3	2010	Saudi Arabia	800,000	MED	Seawater	Al Jubail
4	2016	Saudi Arabia	728,000	MSF	Seawater	Ras Al-Khair (MSF)
5	2022	United Arab Emirates	681,818	RO	Seawater	Umm al Quwain IWP
6	2023	Israel	670,000	RO	Seawater	Soreq 2
7	2013	United Arab Emirates	636,440	MSF	Seawater	Jebel Ali M Station
8	2022	Saudi Arabia	630,000	RO	Seawater	Khobar 2 replacement
9	2013	Israel	624,000	RO	Seawater	Soreq
10	2022	Saudi Arabia	600,000	RO	Seawater	Rabigh 3 IWP
11	2022	Saudi Arabia	600,000	RO	Seawater	Jubail 3a IWP
12	2023	Saudi Arabia	600,000	RO	Seawater	Shoaiba 5 (SWCC)
13	2023	Saudi Arabia	570,000	RO	Seawater	Jubail 3b IWP
14	2017	Saudi Arabia	550,070	MSF	Seawater	Yanbu 3
15	2014	Algeria	500,000	RO	Seawater	Magtaa
16	2016	Kuwait	490,970	MED	Seawater	Az Zour North 1 IWPP
17	1983	Saudi Arabia	472,794	MSF	Seawater	Al Jubail (Phase 2)
18	2011	United Arab Emirates	459,146	MSF	Seawater	Shuweihat 2
19	2004	United Arab Emirates	454,200	MSF	Seawater	Shuweihat 1
20	2010	United Arab Emirates	454,200	MED	Seawater	Al Fujairah 2 (MED)

4.6 RO設備の大型プラント(TOP20)

No	運転開始年	国名	容量 (m ³ /d)	原水	プロジェクト名
1	2022	United Arab Emirates	909,000	Seawater	Taweelah IWP
2	2022	United Arab Emirates	681,818	Seawater	Umm al Quwain IWP
3	2023	Israel	670,000	Seawater	Soreq 2
4	2022	Saudi Arabia	630,000	Seawater	Khobar 2 replacement SWRO
5	2013	Israel	624,000	Seawater	Soreq
6	2022	Saudi Arabia	600,000	Seawater	Rabigh 3 IWP
7	2022	Saudi Arabia	600,000	Seawater	Jubail 3a IWP
8	2023	Saudi Arabia	600,000	Seawater	Shoaiba 5 (SWCC)
9	2023	Saudi Arabia	570,000	Seawater	Jubail 3b IWP
10	2014	Algeria	500,000	Seawater	Magtaa
11	2022	Saudi Arabia	450,000	Seawater	Shuqaiq 3 IWP
12	2023	Saudi Arabia	450,000	Seawater	Yanbu 4 IWP
13	2012	Australia	444,000	Seawater	Victorian Desalination Plant
14	2020	Saudi Arabia	400,000	Seawater	Shoaiba 4 (ex Jeddah 4)
15	2022	Saudi Arabia	400,000	Seawater	Jubail 1 replacement SWRO
16	2023	Saudi Arabia	400,000	Seawater	Shuqaiq 4 (SWCC)
17	2004	Kuwait	375,000	Wastewater	Sulaibiya
18	2009	Israel	368,000	Seawater	Hadera
19	2005	Israel	330,000	Seawater	Ashkelon
20	2013	Singapore	318,500	Seawater	Tuaspring (Tuas II)

- 
1. 造水センターとは
 2. 世界の水環境と海水淡水化技術について
 3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発
 4. 世界の海水淡水化の動向
 5. 日本の海水淡水化の状況
 6. 海水淡水化技術の課題と展望

5.1 日本における海水淡水化（生活用）



生活用の海水淡水化量：
約120,000m³/d
(43箇所)
(RO法：10.6万m³/d)
【離島用の生活用水が多い】

工業用の海水淡水化量：
集計は難しいが、生活用
と同等以上

5.2 海水淡水化技術に関する日本企業例

項目	機器・技術	日本企業	備考
取水	取水ポンプ	西島製作所、電業社	独Sulzerなど
	浸透取水	日立造船／ナガオカ	
前処理	UF膜	旭化成ケミカルズ、東レ	蘭Norit、独INGE
	DAFシステム	(多数)	米Xylem
RO	RO膜	東レ、日東電工、東洋紡	米Dow
	ROベッセル	プロテックアリサワ	
	高圧ポンプ 増圧ポンプ	西島製作所、電業社	独Sulzerなど
動力回収装置 (ERD)	ERD 又はポンプ	西島製作所 (米FEDCOターボチャージャとの連動ポンプ) 電業社DeROs (PX往復式のERD)	PX回転式: 米ERI社 PX: DWEEER社 ペルトン水車型: 多数
その他	薬剤	栗田工業など	NALCOなど

* 海水淡水化のエンジニア会社: 三菱重工、日立製作所、協和機電工業など

出典: 加藤、METI懇談会(2017)

5.3 日本の海水淡水化プラント -仕様-

項 目	沖縄プラント	福岡プラント
建設年	1996	2005
施設容量	40,000m³/d	50,000m³/d
ユニット容量x系列数	5,000m ³ /d× 8系列	10,000m ³ /d×5系列
取水設備	深層取水方式	海底ろ過方式
前処理設備	凝集ろ過方式 (圧力式二層ろ過+ポリッシングろ過)	限外ろ過システム (スパイラルPVDF膜)
ROモジュール形式	スパイラル形式 (ポリアミド複合膜)	中空糸形式 (三酢酸セルロース膜)
RO回収率	40%	55－60%
運転圧力	7-7.5 MPa	8.0 MPa
エネルギー回収方式	逆転ポンプ	ペルトンタービン
後処理設備	無	ホウ素除去
放流設備	深層放流ノズル方式	下水混合方式

5.3 日本の海水淡水化プラント -沖縄-

沖縄海水淡水化施設

海水淡水化施設



浄水場の水量は $200,000 \text{ m}^3/\text{d}$

($5,000 \text{ m}^3/\text{d}$ /ユニット、バンク)



5.3 日本の海水淡水化プラント -福岡-



施設面積は約4万m²

福岡地区水道企業団

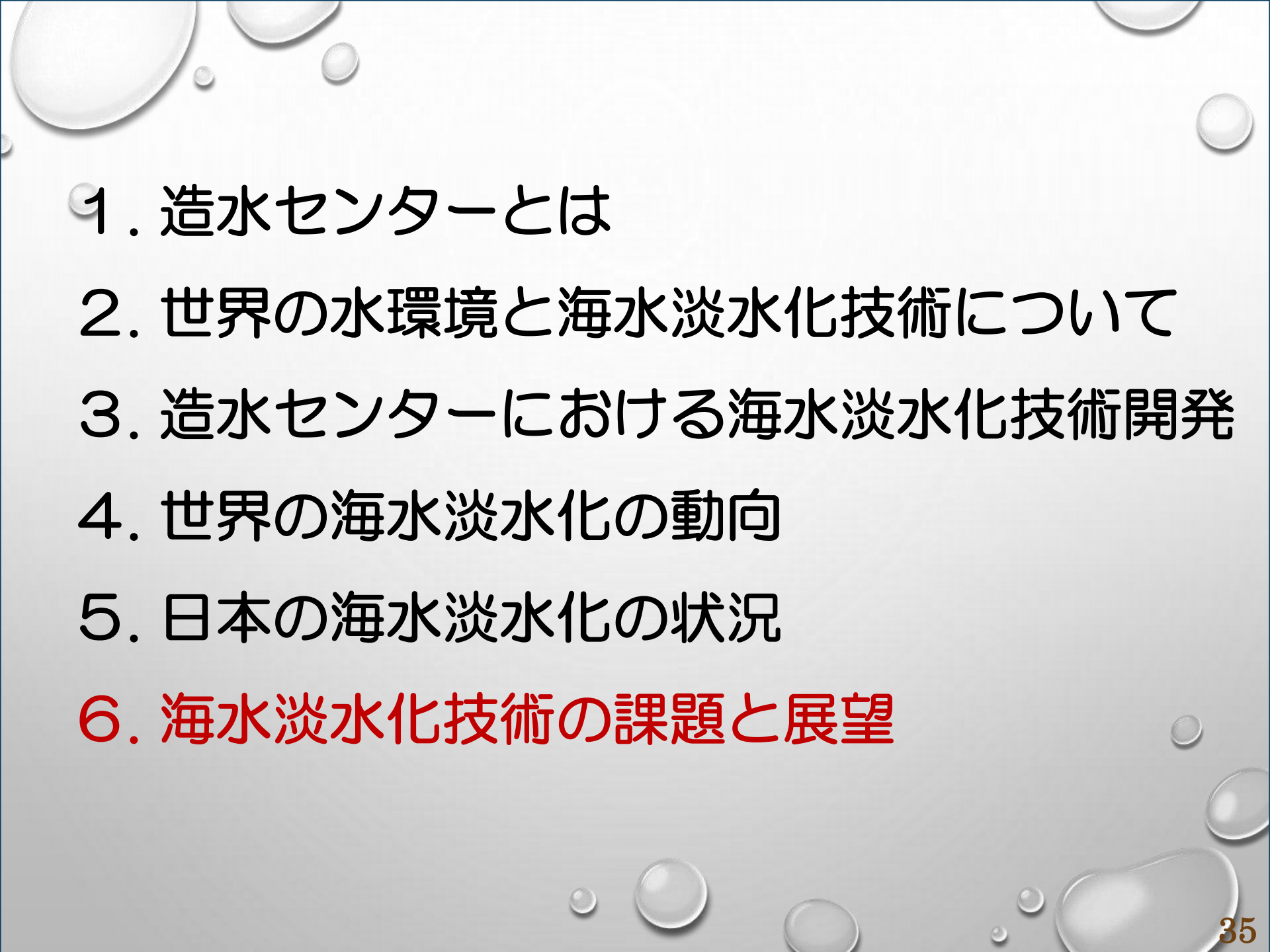
●海水淡水化設備

処理規模: 50,000 m³ /d

逆浸透 (RO) 法

2005年竣工



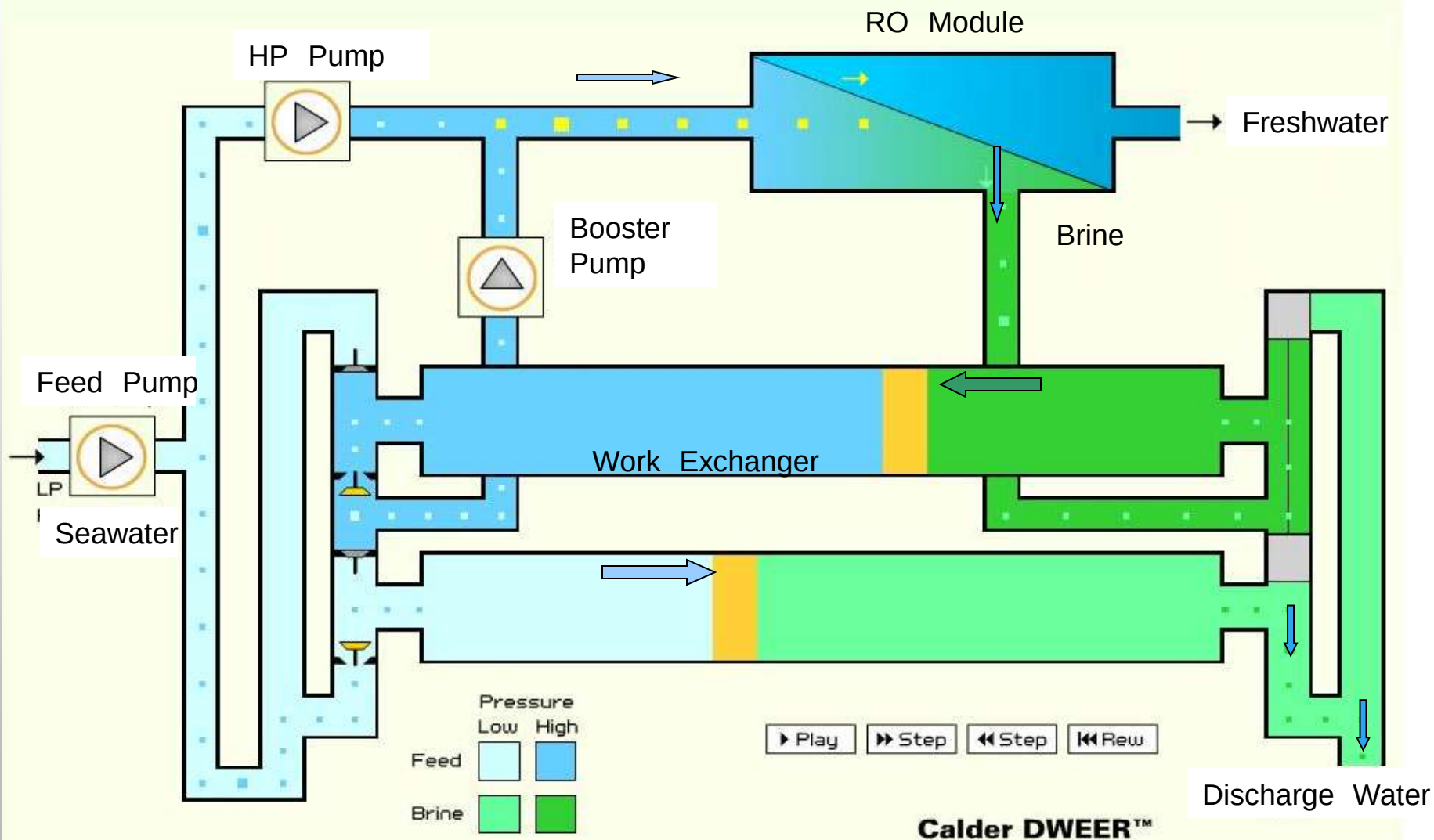
- 
1. 造水センターとは
 2. 世界の水環境と海水淡水化技術について
 3. 造水センターにおける海水淡水化技術開発
 4. 世界の海水淡水化の動向
 5. 日本の海水淡水化の状況
 6. 海水淡水化技術の課題と展望

6. 海水淡水化技術の課題・対応策と具体例

課題と対応策		具体例
膜	膜性能の改善 ① 高性能膜の開発 ② 運転条件の最適化(膜面流速、温度、洗浄等)	・カーボンナノチューブ含有膜(信州大) ・高フラックス・高排除率膜(各膜メーカー)
	耐ファウリング性の向上 ① 低ファウリング膜の開発 ② 前処理の適正化、ファウリング抑制剤等	・低汚染膜(各膜メーカー) ・バイオフィウリング防止膜(神戸大) ・ファウリング防止剤(栗田、オルガノ)
システム	省エネ性の向上 ① AIによる運転条件の最適化 ② エネルギー回収装置の利用 ③ 創エネ技術の活用	・産業排水処理のAI制御(栗田) ・ 国産エネルギー回収(電業社) ・ 濃縮水活用PRO(協和機電工業)
	低コスト化 ① 再生可能エネルギーの活用 ② システムで対応(前処理、ベッセル内組合せ等)	・ 太陽光発電システム活用(各エンジ) ・高回収システム(日立) ・廃棄膜の再利用(ISO化)
	濃縮技術の向上 ① 耐圧膜、モジュールの開発 ② 高濃縮プロセスの開発(FO膜、MD膜利用等)	・超高压膜(日東など) ・ BCプロセス(東洋紡) ・ FO膜利用海淡(JFEなど)
	環境負荷の低減 ① グリーン淡水化(無薬注海水淡水化) ② 海淡・水再利用統合システム ③ 海水総合利用	・無薬注海淡(三菱重工) ・ Remixシステム(日立) ・有価塩の回収(NEOMなど)

6.1 海水淡水化の省エネ

<エネルギー回収装置のフロー>



6.1 海水淡水化の省エネ

■ 国産初のエネルギー回収装置



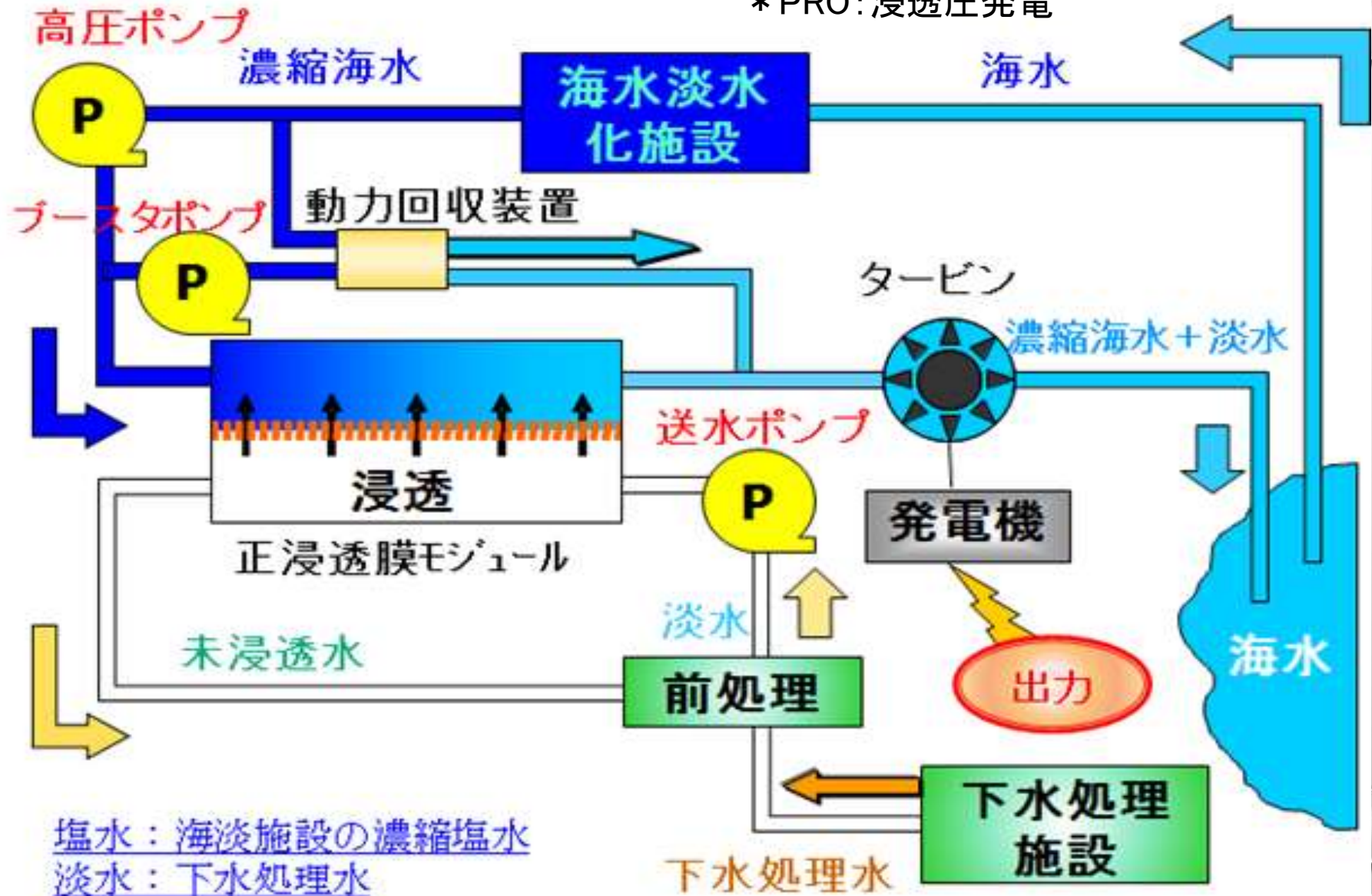
逆浸透膜法海水淡水化用エネルギー回収装置『DeROs』電業社機械製作所 |

イプロスものづくり (ipros.jp)

<https://www.ipros.jp/product/detail/2000669052/>

6.2 海水淡水化濃縮水活用PRO

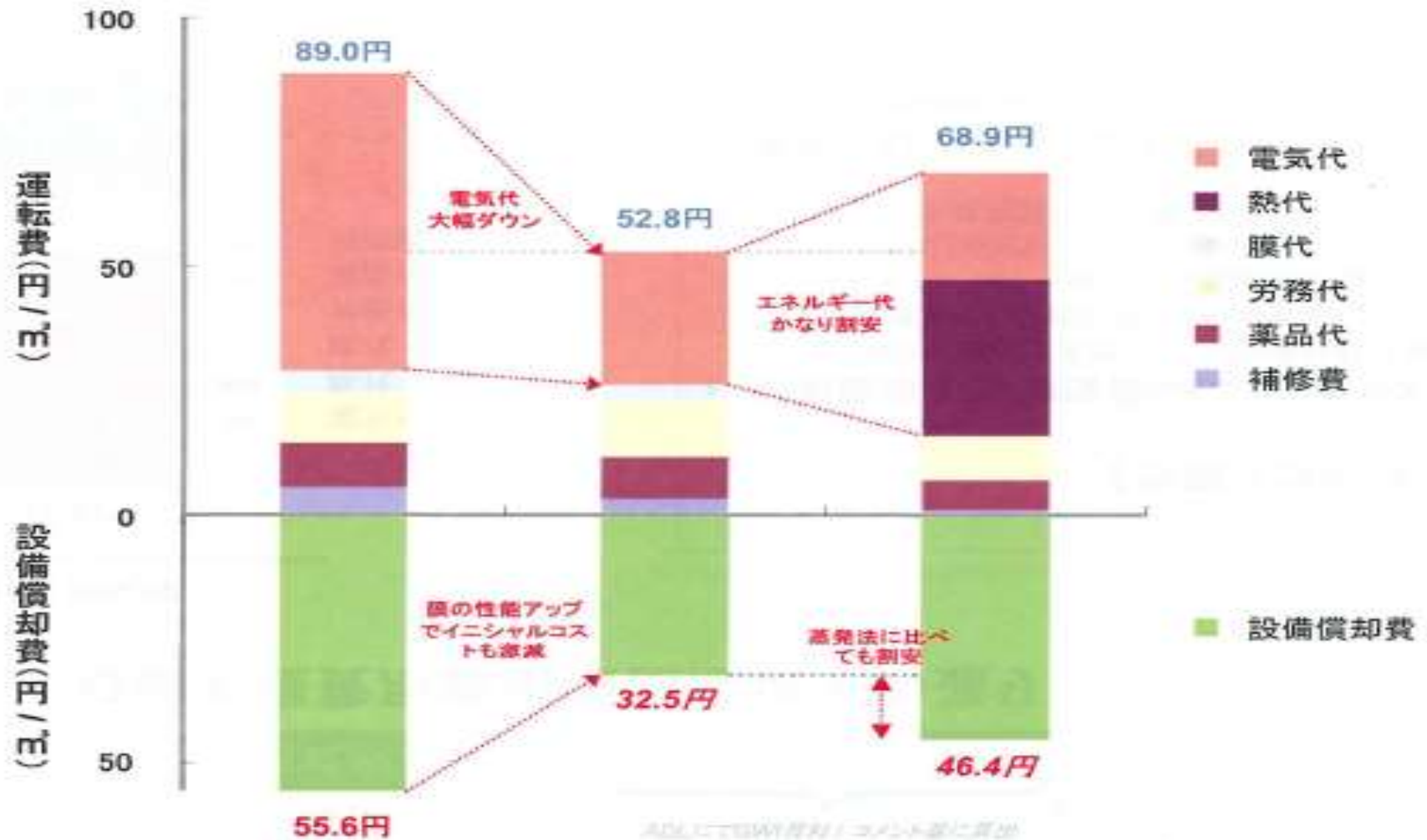
* PRO: 浸透圧発電



6.3 海水淡水化のコスト

海水淡水化技術のコスト比較

RO膜(2000年) ⇒ RO膜(2007年) 蒸発法(2007年)



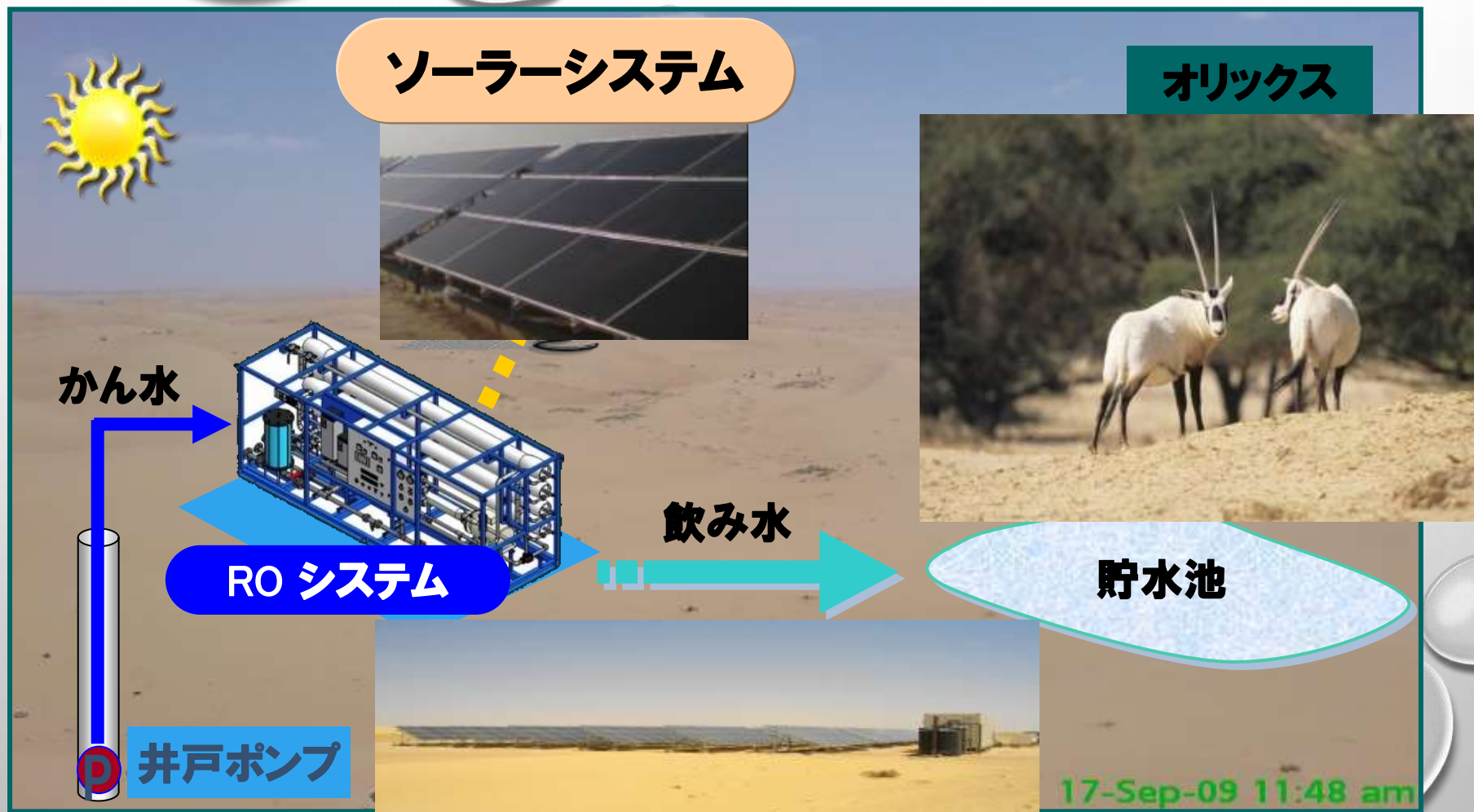
6.3 海水淡水化のコスト

■最近の造水コスト

● Rabiing 3 (Saudi Arabia)	600,000 m ³ /d	\$0.53/m ³
● Shuqaiq 3 (Saudi Arabia)	380,000 m ³ /d	\$0.51/m ³
● Taweelah (UAE)	909,200 m ³ /d	\$0.49/m ³
● Jubail 3A (Saudi Arabia)	600,000 m ³ /d	\$0.41/m ³
● Soreq 2 (Israel)	672,000 m ³ /d	\$0.40/m ³
● Hassyan (UAE) (Saudi Arabia)	545,000 m ³ /d	\$0.28/m ³

Source: GWI/18 September 2018
GWI/WDR, 3 Dec 2018
GWI/DesalData, 23 January 2019

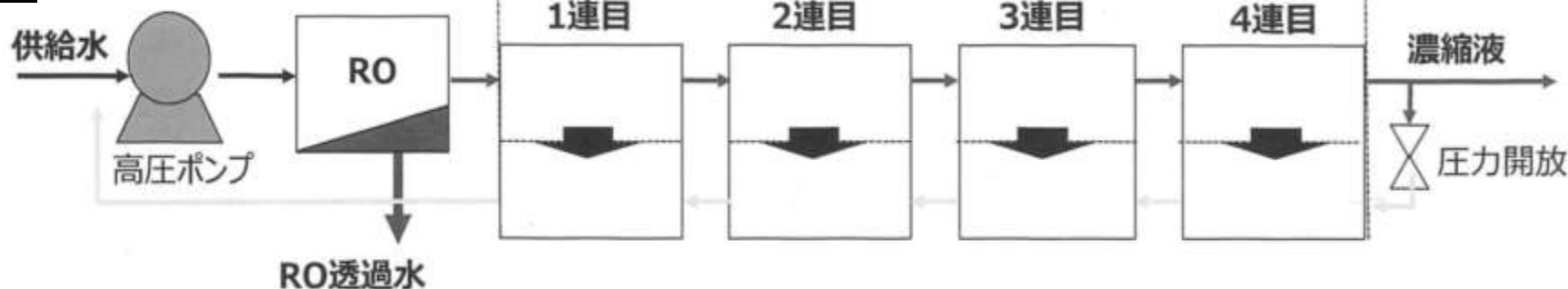
6.4 海水淡水化の省エネ（ソーラーRO）



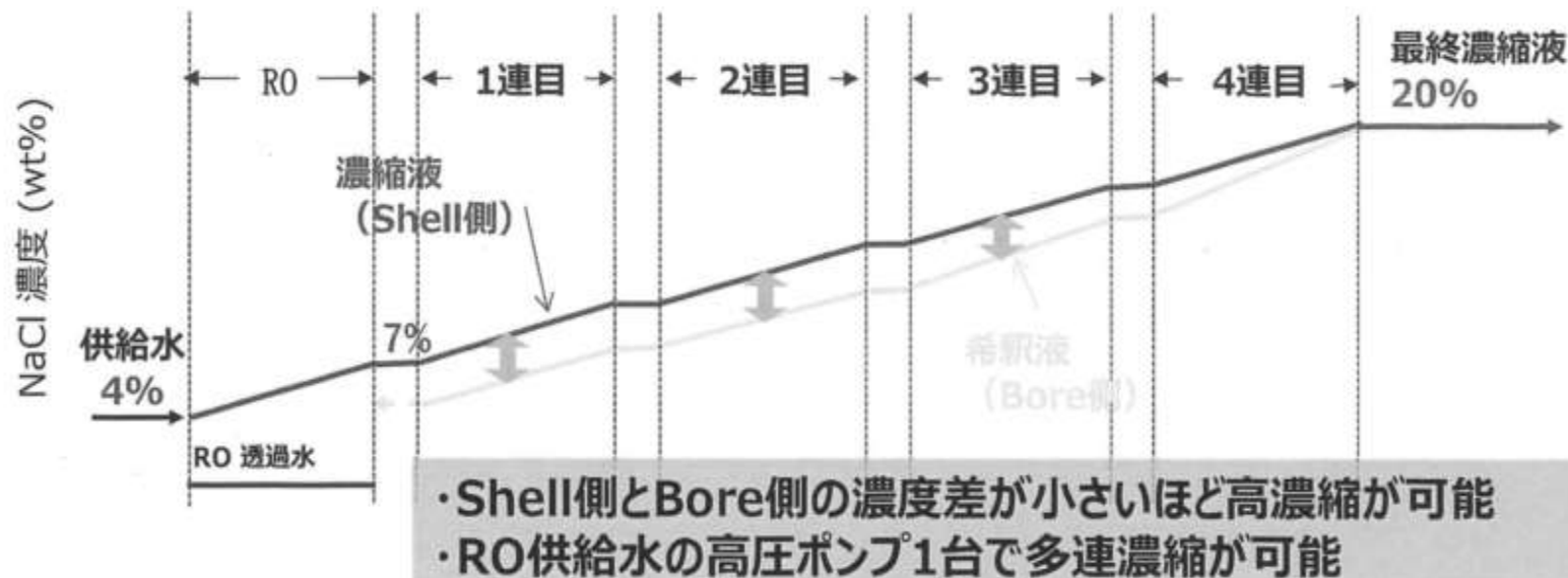
用途: 砂漠に生息するオリックス (絶滅危惧種) の水飲み場に供給
処理能力: $4.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ソーラー出力: 45 kW 数量: 15式

6.5 濃縮技術の向上—BCプロセス

—多連濃縮プロセスフロー



多連濃縮プロセスにおける濃度の推移



備考:

本プロセスにより高濃縮且つ連続運転が可能
連数は必要な最終濃度による

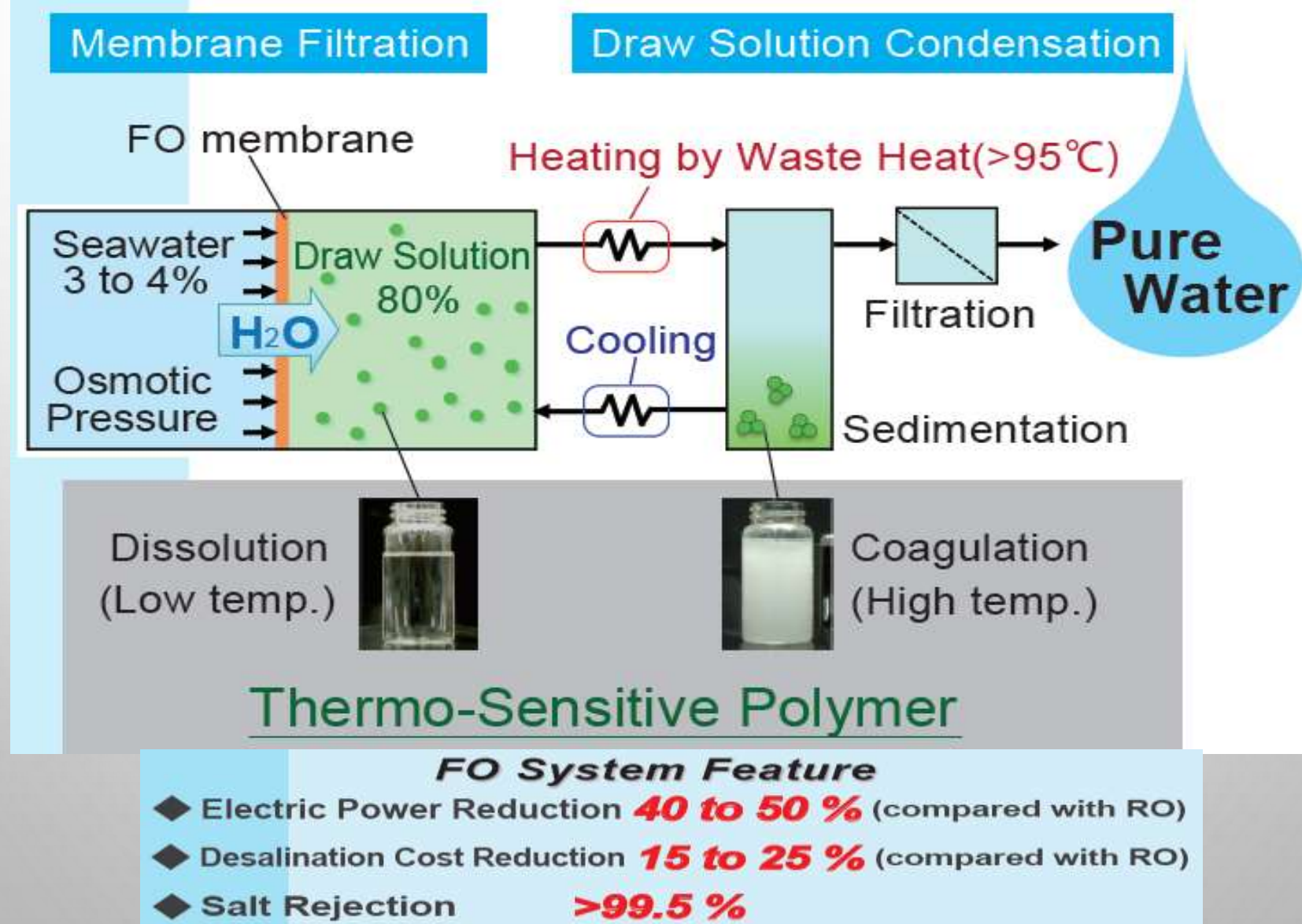
6.6 海水淡水化FO膜システムの開発状況

開発者	DS	特記事項
Yale大学	重炭酸アンモニウム (60~70℃で水と分離)	FO法の海淡適用への スタート
Modern Water社 (英)	DSの再生は、RO膜	100m ³ /dの実機 (オマーン) FO膜は、中空糸膜
Trevi Systems社 (米)	温度応答性の独自DS	UAEで実証 (排熱利用で1.3kWh/m ³) 太陽熱との組合せも検討
JFEエンジ社 (日)	感温性ポリマー	サウジと共同開発 排熱利用

出典: 熊野敦夫, 膜, 43, (1), 9-15 (2018) を元に表を作成

6.6 海水淡水化FO膜システムの開発状況

●JFEエンジニアリング社のFO膜海水淡水化システム



6.7 海水淡水化の環境負荷低減

■ 海淡施設のウォーターフットプリント

福岡施設

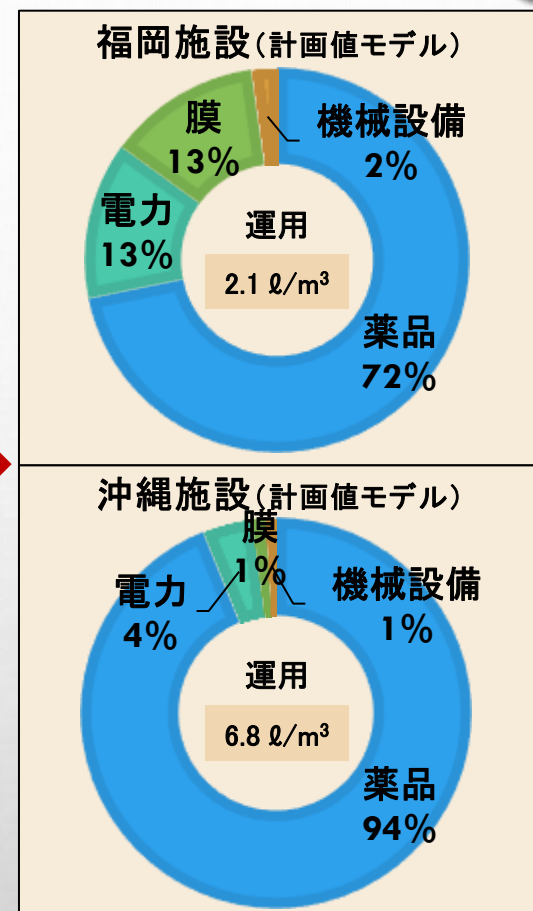
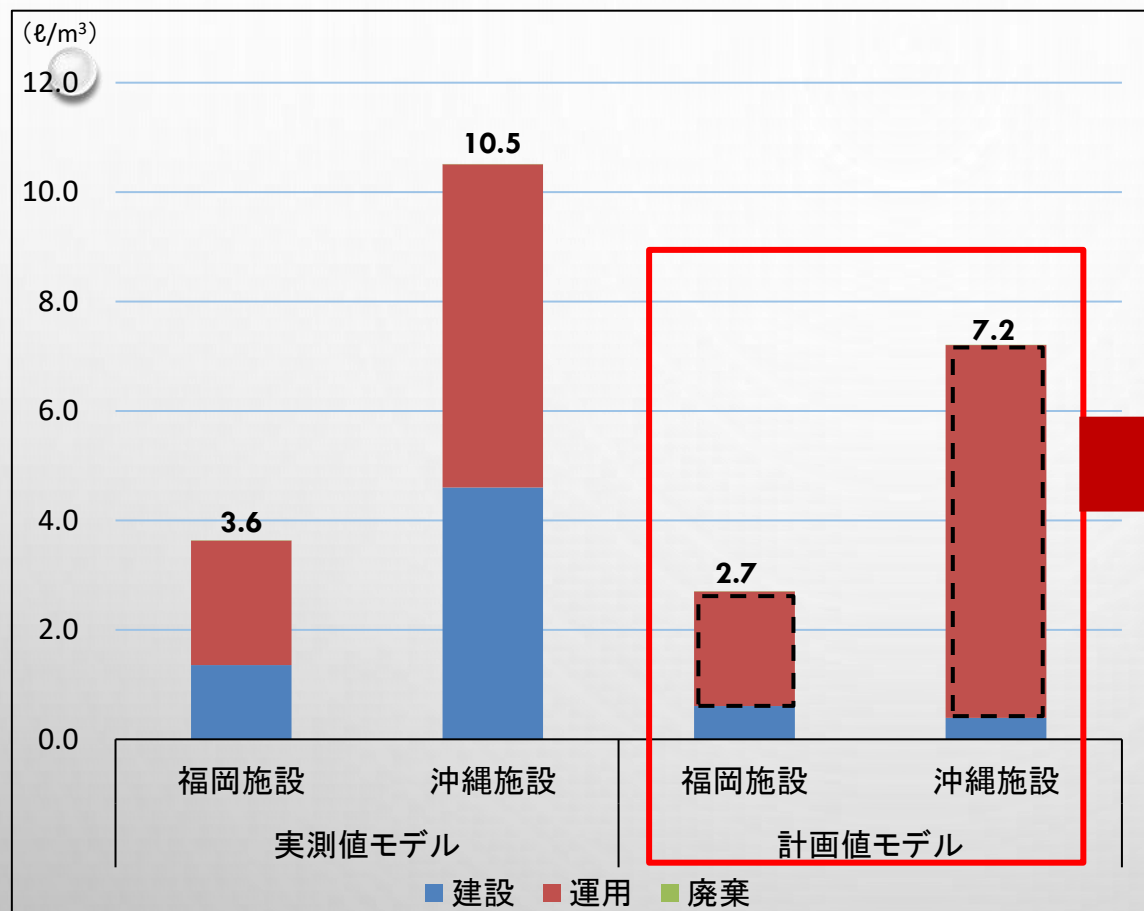
<評価対象概要>

沖縄施設

施設名称	福岡地区水道企業団海水淡水化センター	沖縄県企業局北谷浄水管理事務所 海水淡水化センター
施設写真		
所在地	福岡県福岡市東区	沖縄県中頭郡北谷町
生産方式	逆浸透法 (RO)	逆浸透法 (RO)
取水方式	浸透取水方式	海底取水管方式
放流方式	水中拡散放流方式	水中拡散放流方式
最大生産水量	約50,000m ³ /d	約40,000m ³ /d
最大取水量	約103,000m ³ /d	約108,000m ³ /d
前処理	UF膜	砂ろ過
供給開始年月	2005年6月	1996年2月
事業費	約408億円	約347億円
延床面積	約21,202m ²	約17,600m ²

6.7 海水淡水化の環境負荷低減

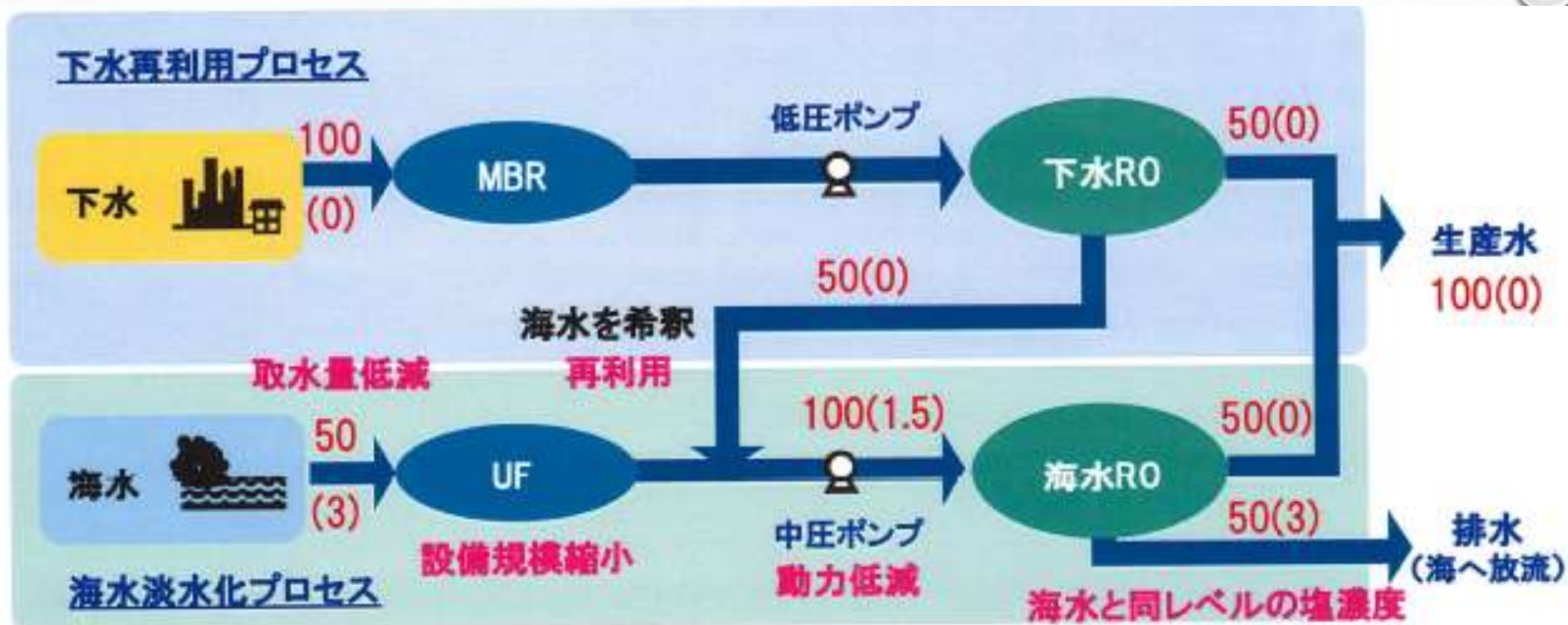
■ 海淡施設のウォーターフットプリント



- 福岡施設、沖縄施設の運用段階におけるWFはどちらも**薬品由来**の水消費が大部分を占める結果となった。
- 沖縄施設で用いられている逆浸透膜は塩素に弱いため、取海水に対し「殺菌」を目的として注入した塩素系薬品を逆浸透膜透過前に還元する必要があるため、相対的に薬品の使用量が増える。

6.7 海水淡水化の環境負荷低減

■海淡-水再利用統合システム【NEDOプロジェクト】



(RO回収率50%の例。図中の数字は水量(-)、括弧内は塩分濃度(%))

省エネ

✓ 海水の塩濃度を下げることによりROポンプ動力を低減

低環境
負荷

✓ 海水RO排水の塩濃度を海水と同レベルに

低コスト

✓ 海淡前処理の規模縮小
(取水量低減)

© Hitachi, Ltd. 2015. All rights reserved.

7

ご清聴ありがとうございました



〒103-0003 東京都中央区日本橋横山町4番5号
一般財団法人 造水促進センター

TEL:03-5644-7565 FAX:03-5644-0686

URL: <http://www.wrpc.jp/index.htm>

Salt & Seawater Science Seminar 2023

母なる海の恵み～海水からのものづくり～ 「イオン交換膜法製塩工場における 有価資源回収の現状」

ナイカイ塩業株式会社

1)研究開発部, 2)製塩部, 3)化成品部

吉田 諒一¹⁾, ○小林 秀嗣¹⁾, 藤原 秀昭²⁾, 濱野 一平²⁾,
小田 慎也³⁾, 越宗 昭年³⁾, 田中 積伸³⁾, 石井 健²⁾



目次

- ナイカイ塩業について
- 海水中に溶存する主な資源
- 海水利用プロセス概略～2系統の利用プロセス～
弊社製品について
- 各溶存資源の利用状況
- 逆浸透(RO)膜を用いた海水利用について
- 今後の展開



えんぎょう ナйкаイ塩業について ～概要～

創業	: 1829年(文政12年)...創業194年
会社設立	: 1934年(昭和9年)4月
代表取締役社長	: 野崎 泰彦
資本金	: 180,000千円
従業員	: 145 人
業種	: 塩製造・化成品製造(工業薬品,添加物,肥料)・不動産
住所	: <本社>

〒711-0913 岡山県倉敷市児島味野1-11-19

TEL: 086-472-2002 FAX: 086-474-4328

<本社工場(塩・化成品の工場)>

〒706-0305 岡山県玉野市胸上2721番地

TEL: 0863-41-1501 FAX: 0863-41-1506

<https://www.naikai.co.jp>



岡山の地にて、塩・化成品製造をコアに
ナйкаイグループ10社で邁進中



えんぎょう ナйка塩業について ～沿革～



1829： 創業者の野崎武左衛門が倉敷市児島に入浜式塩田を築造し
(文政12年) 塩作りを開始

1934： 株式会社野崎事務所設立

1938： 真空式製塩工場新設(15,000 トン/年)

1941： 苦汁処理工場を併設し、化成品事業を開始

1962： 水酸化マグネシウムの生産を開始

1969： イオン交換膜法海水濃縮設備を稼働

1993： せんごう設備全面更新(最大210,000 トン/年)

1999： 品質マネジメントシステムISO9002認証取得

2002： 酸化マグネシウム工場完成
(2009年 同第二工場完成)

2003： 品質マネジメントシステムISO9001登録

2006： 環境マネジメントシステムISO14001登録

2010： 炭酸マグネシウム工場完成

2017： 水酸化マグネシウム第二工場完成

2022： 食品安全システム認証FSSC22000取得



5



本社工場全景





海水中に溶存する主な資源

陰イオン	濃度 [g/kg-海水]
Cl ⁻	18.980
SO ₄ ²⁻	2.648
HCO ₃ ⁻	0.139
Br ⁻	0.065

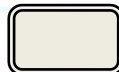
陽イオン	濃度 [g/kg-海水]
Na ⁺	10.556
Mg ²⁺	1.272
Ca ²⁺	0.400
K ⁺	0.380

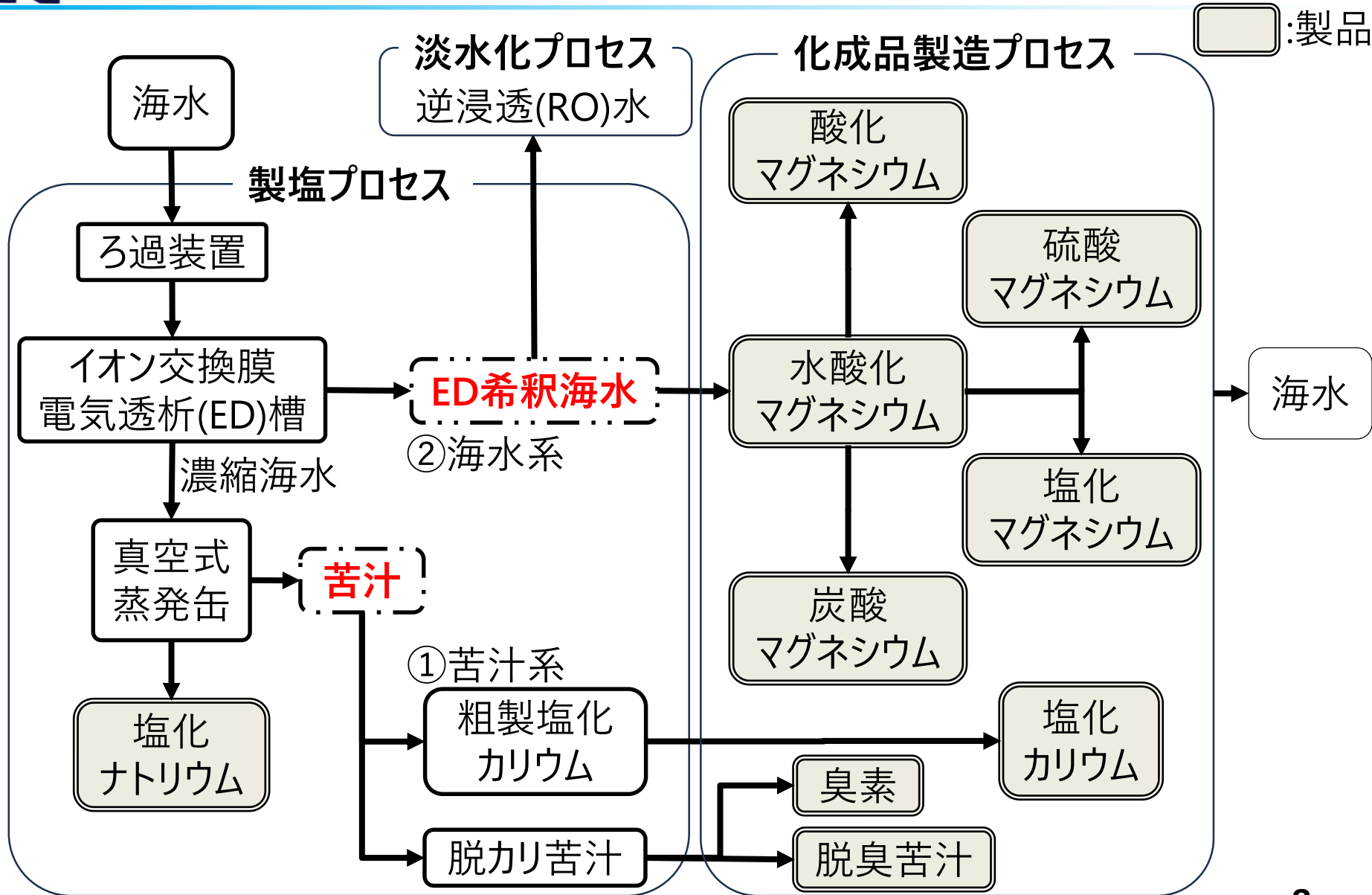
- ・主な資源を合計すると約35(g/kg-海水)
- ・Na⁺はNaCl、Mg²⁺はマグネシウム化合物、K⁺はKClとして利用
- ・溶存陰イオンであるBr⁻は、Br₂として利用

(引用文献：海水と製塩-データブック-((公財)塩事業センター発行)
海水の科学と工業(日本海水学会・ソルトサイエンス研究財団共著))



海水利用プロセス概略

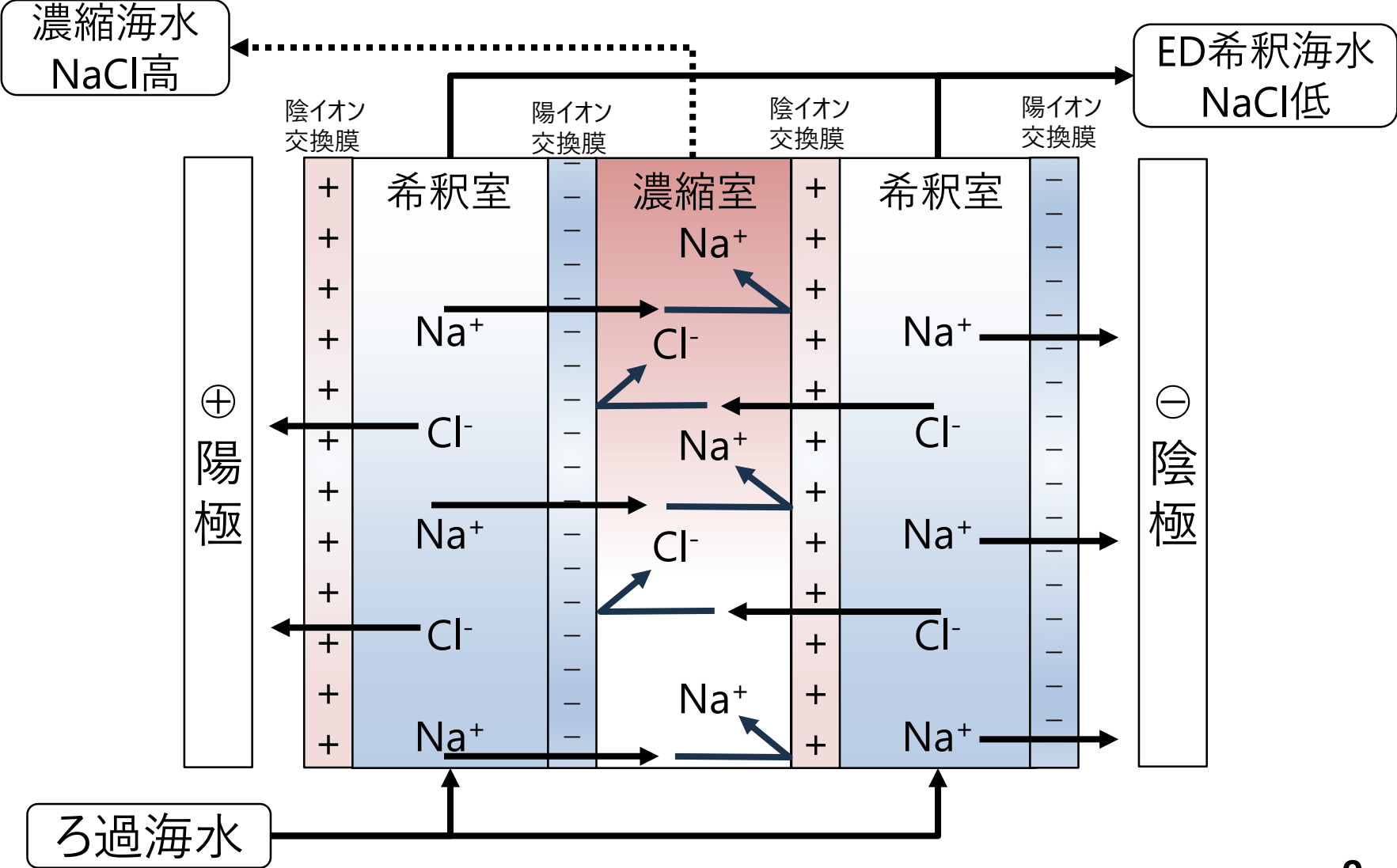
:製品





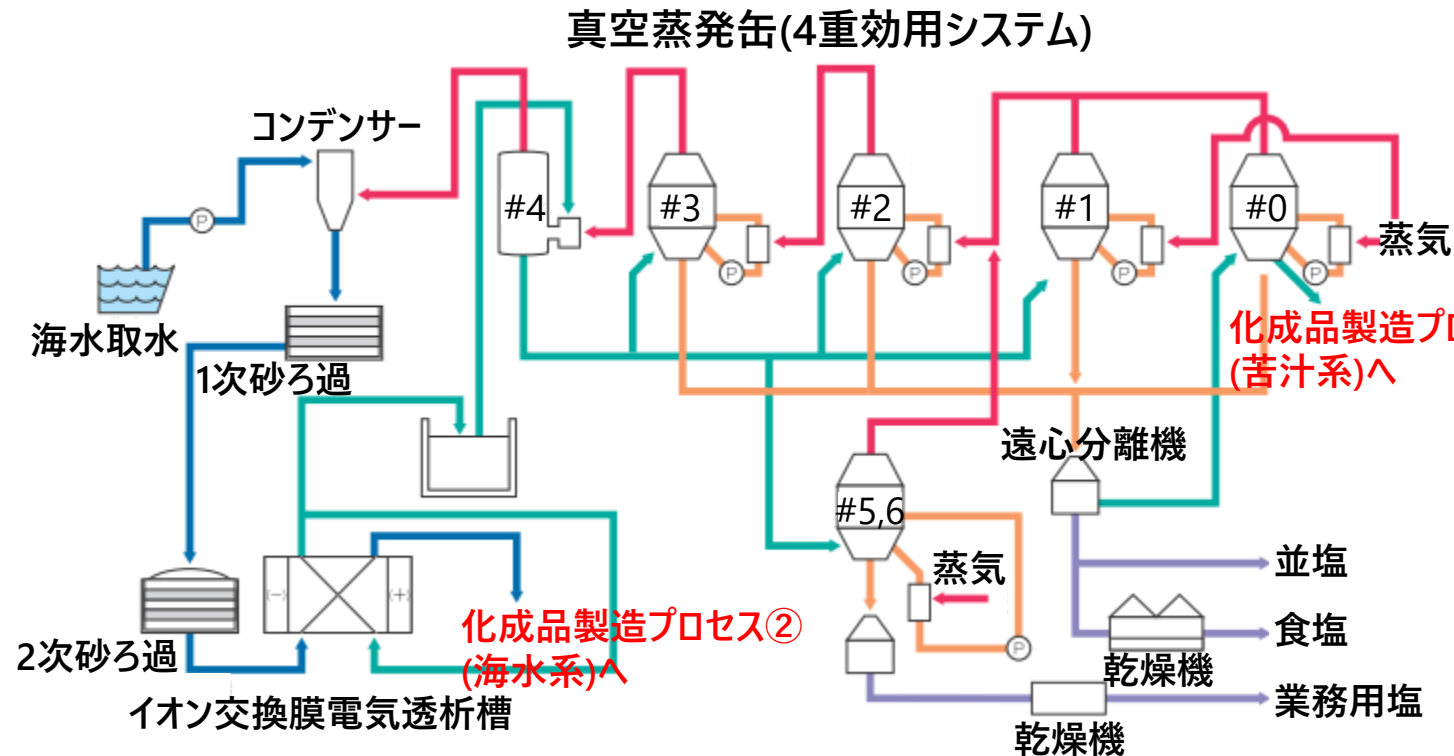
イオン交換膜電気透析槽

電気透析(ED): electrodialysis





製塩プロセス



真空蒸発缶



ボイラー



1 次砂ろ過装置



2次砂ろ過装置



イオン交換膜電気透析槽

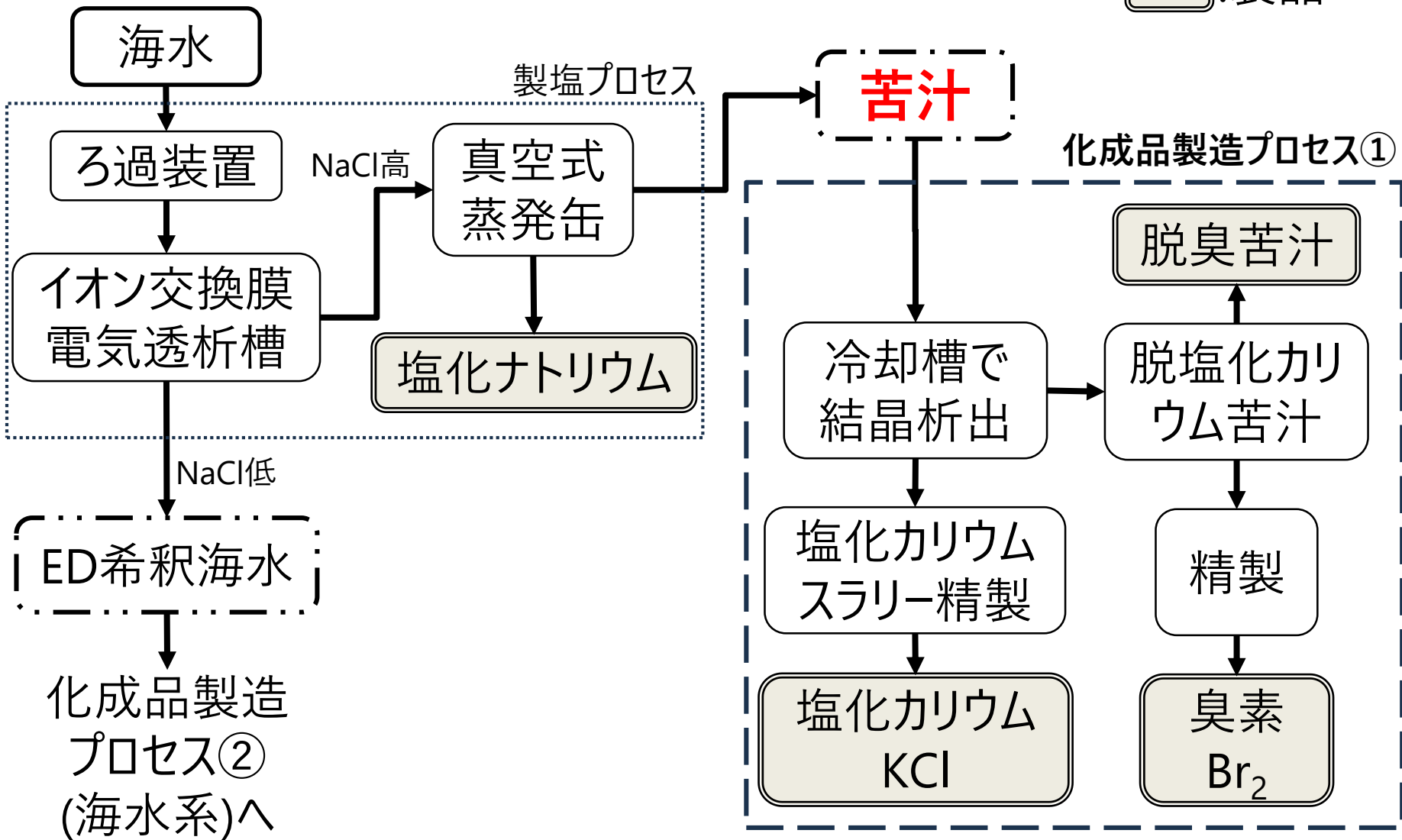


充填包装



化成品製造プロセス①(苦汁系)概略

:製品

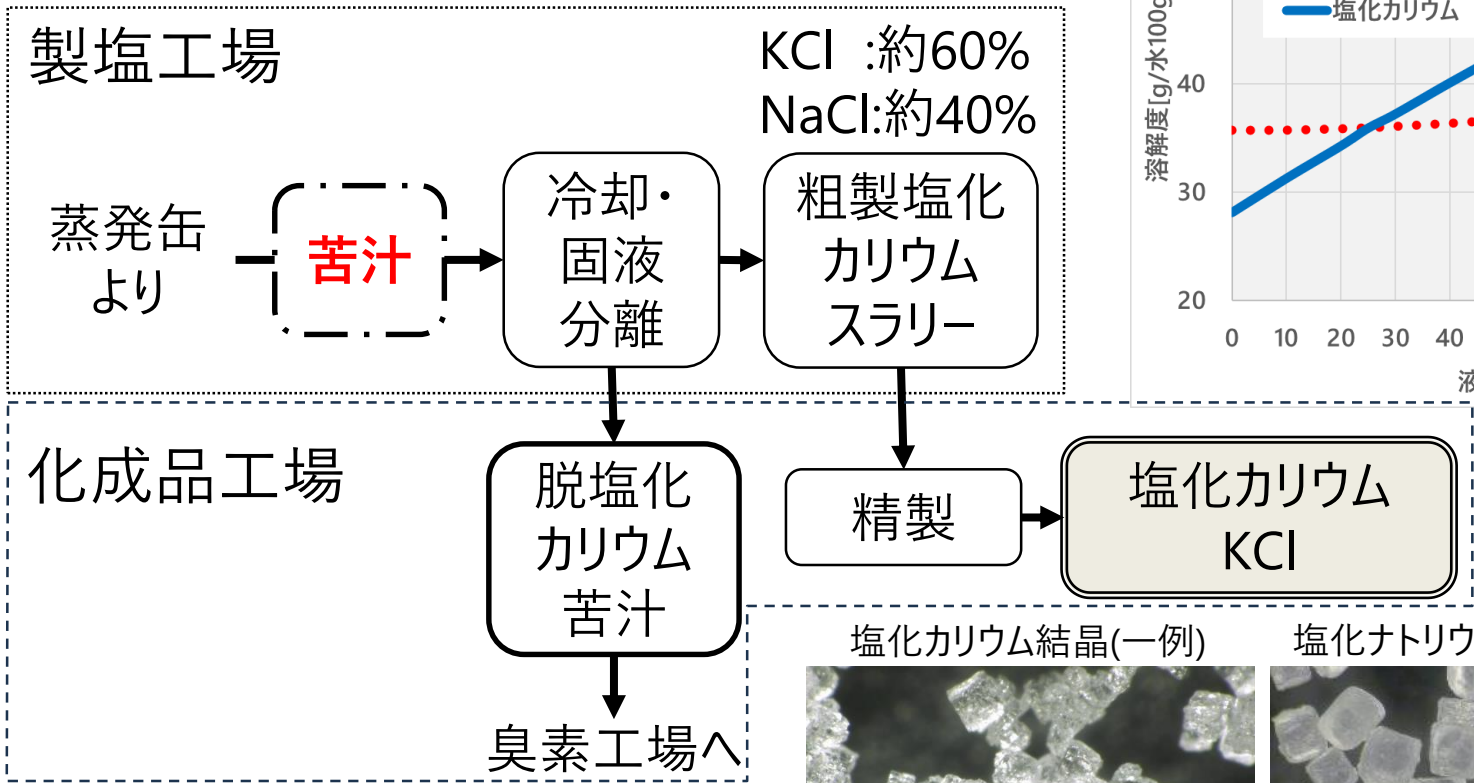
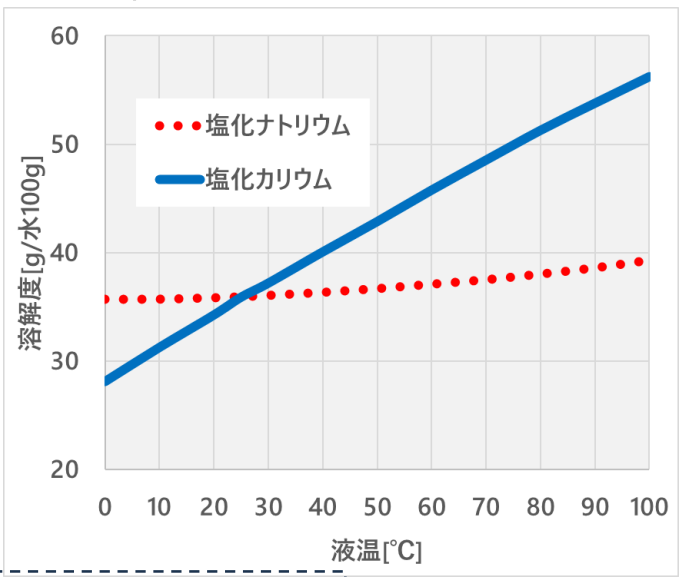




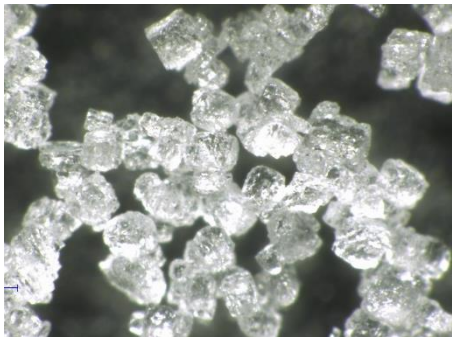
塩化カリウム

- 用途：肥料、工業薬品
- 形状：無色立方晶

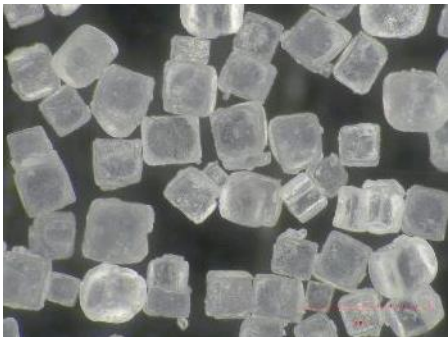
溶解度の温度依存性



塩化カリウム結晶(一例)



塩化ナトリウム結晶(一例)



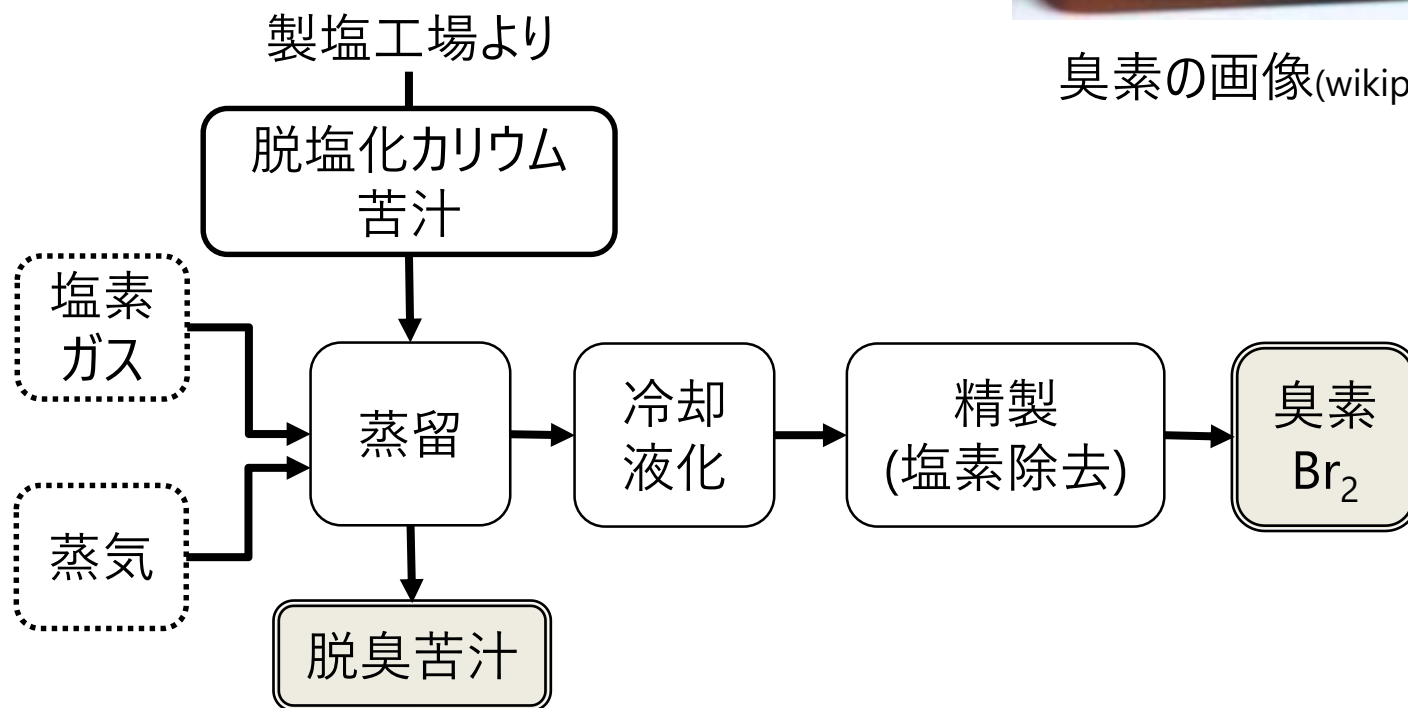


臭素

- 用途：難燃剤原料、農薬、工業薬品
- 反応： $\text{MgBr}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{Br}_2 \uparrow$
- 脱臭素した後の苦汁は「脱臭苦汁」として活用

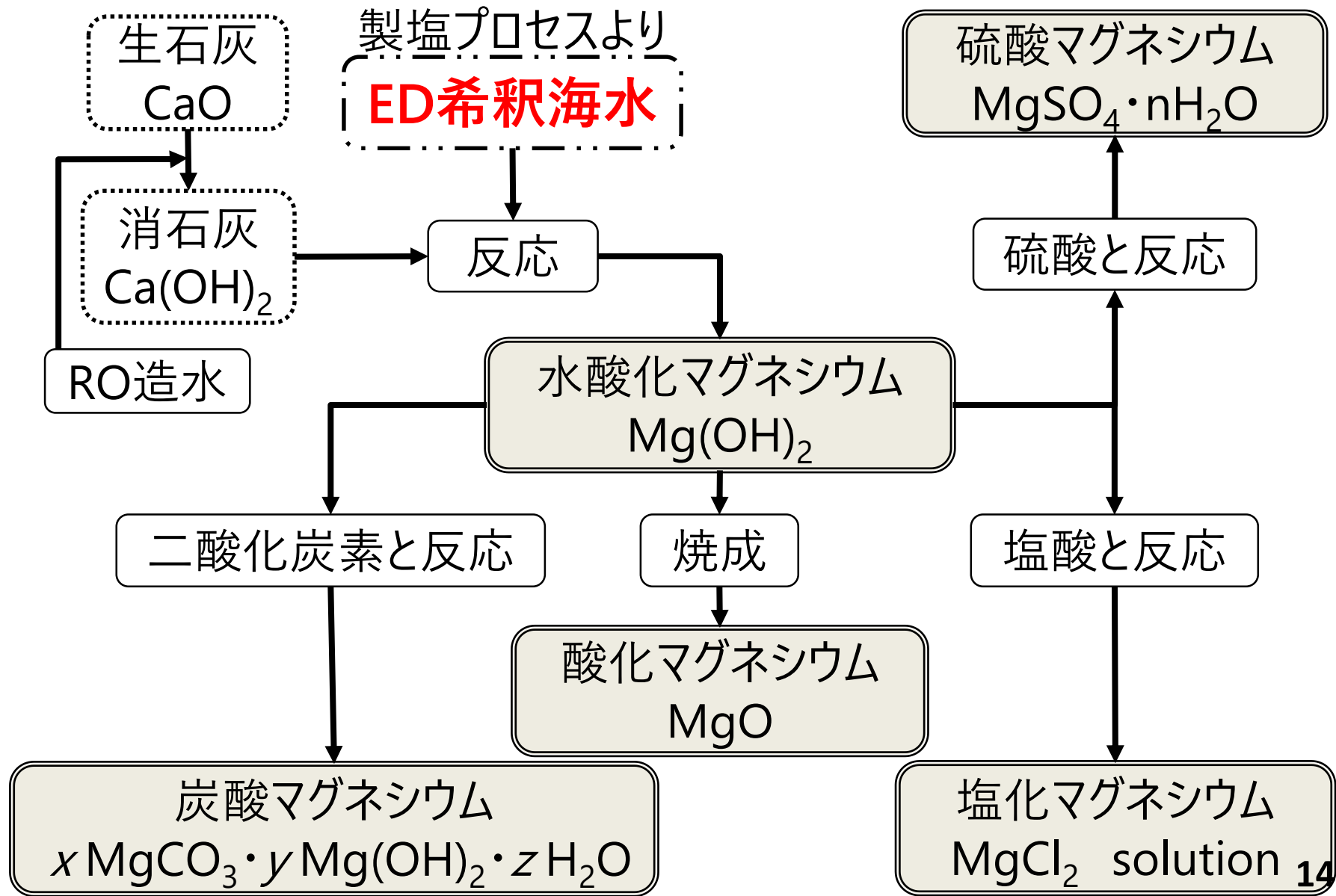


臭素の画像(wikipediaより)





化成品製造プロセス②(海水系)概略





海水中に溶存する陽イオンの濃度

陽イオン	濃度 [g/kg-海水]
Na ⁺	10.556
Mg²⁺	1.272
Ca ²⁺	0.401
K ⁺	0.387

・Mg²⁺ は、Na⁺ に次ぐ2番目に多い陽イオン。

・海水中の資源量：マグネシウム換算で 1.8×10^7 億トン



水酸化マグネシウム

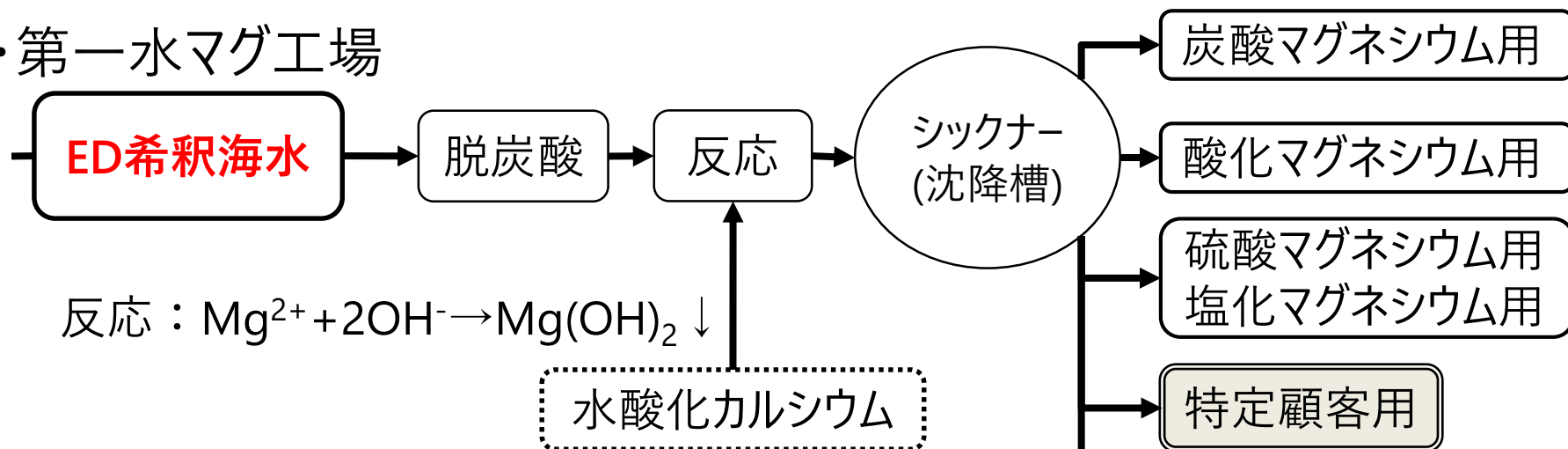
- 用途：排煙脱硫、排水中和、難燃剤、工業薬品
- 現在の製品種別は大きく2種類

種別	特徴
スラリー品 (主に排煙脱硫用)	一般用 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ：35%品
	一般用 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ：40%品
	特定顧客用
乾燥品	一般用(工業用)
	特定顧客用
	肥料用

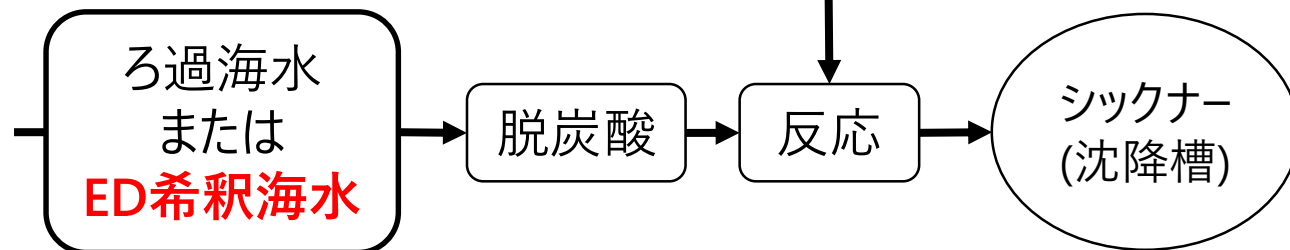


水酸化マグネシウム製造プロセス

・第一水マグ工場



・第二水マグ工場



シックナー(手前側 直径50m,
奥側 直径25m)



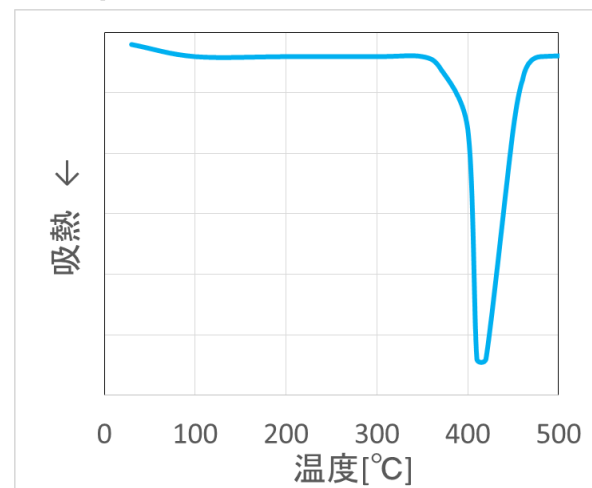


酸化マグネシウム

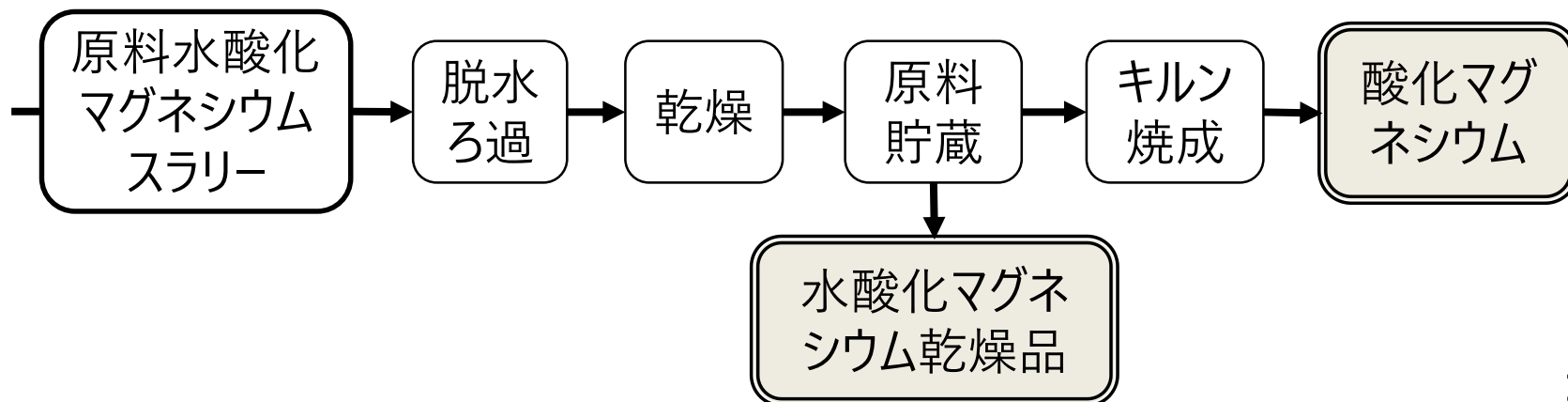
- 用途：医薬品原料、工業用(ゴム充填材等)
- 反応： $\text{Mg}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{MgO} + \text{H}_2\text{O}$
- 焼成温度の違いで数グレード



ロータリーキルン



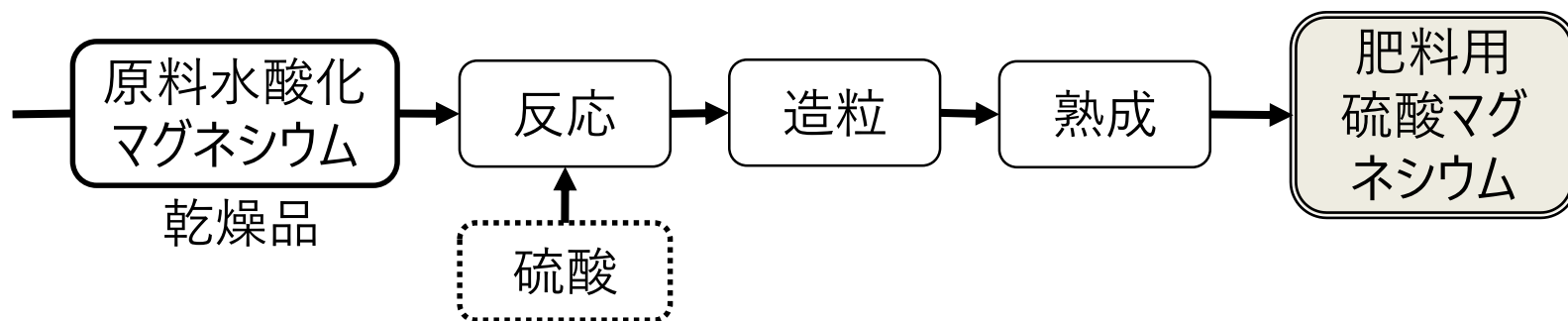
水酸化マグネシウムの示差熱分析
(海水利用ハンドブックより)





硫酸マグネシウム①

- 硫酸マグネシウム($\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)：粒状、粉状
- 反応： $\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MgSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
- 反応後に水分添加して転動造粒

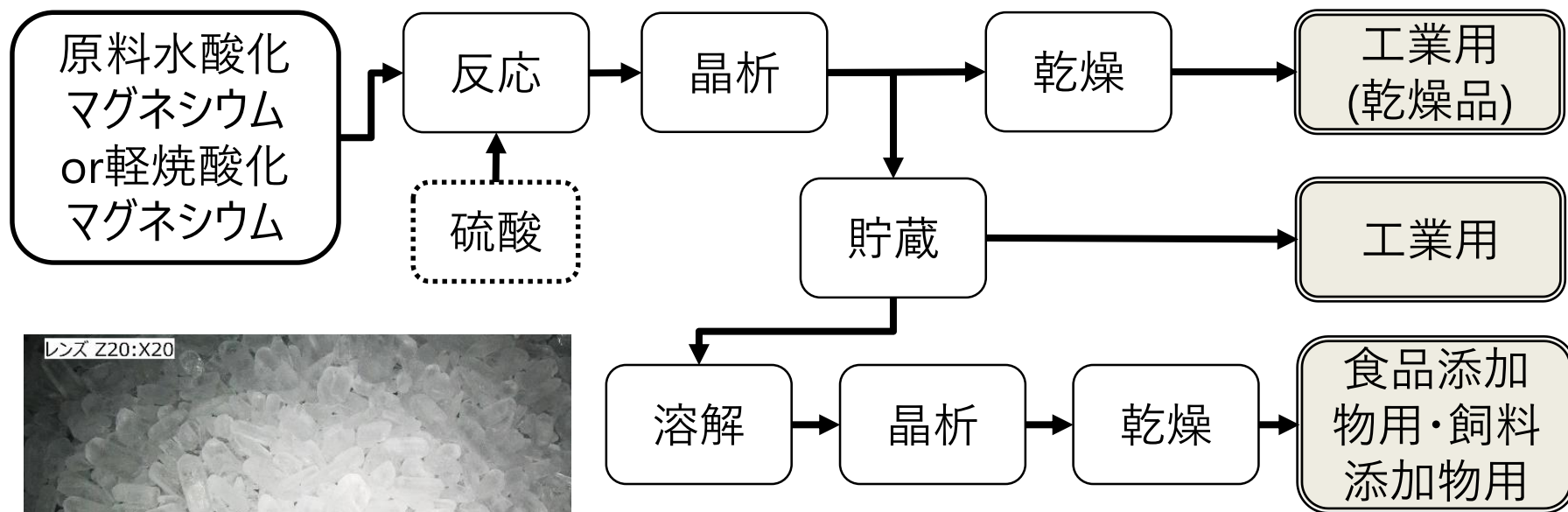


粒状品



硫酸マグネシウム②

- 硫酸マグネシウム($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)：無色柱状結晶
- 反応： $\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{MgSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$



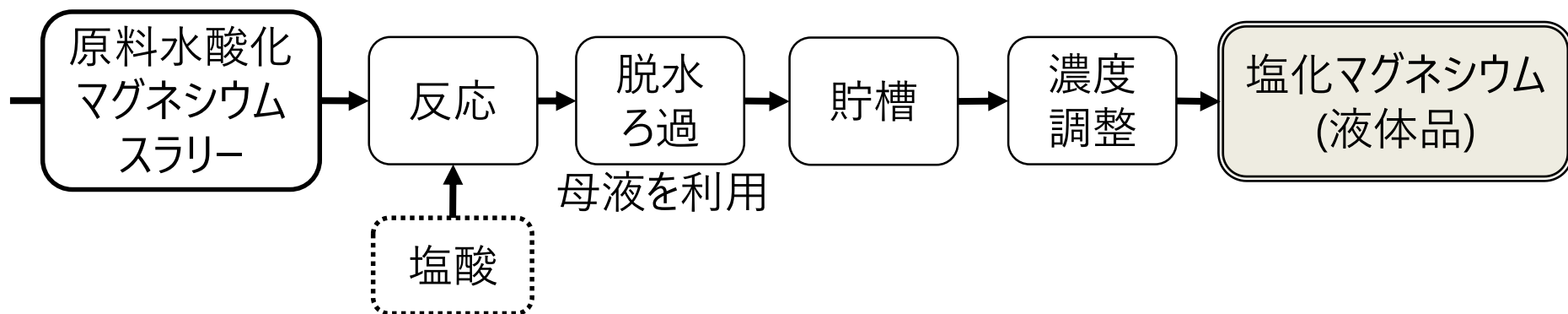
乾燥後の結晶

浴用剤用途で好調



塩化マグネシウム

- 用途：排水中和、防塵剤・耐火原料
- 反応： $\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$



・現在、フレーク(薄片状)品は製造委託し、弊社は品質保証のみ実施



炭酸マグネシウム

化学名： 塩基性炭酸マグネシウム

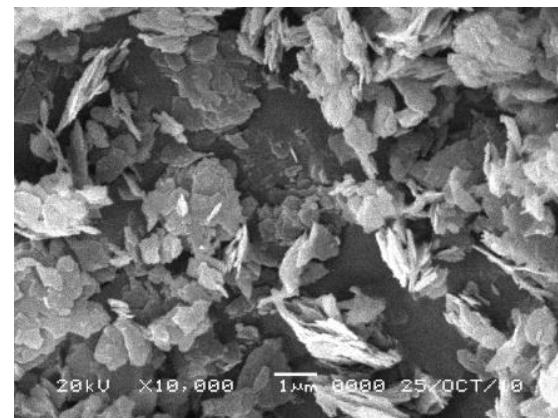
- ・医薬・工業分野にて、一般的に炭酸マグネシウムはこれを指す。
- ・「炭マグ」や「炭麻」と呼ばれている。

化学式： $x\text{MgCO}_3 \cdot y\text{Mg(OH)}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$

- ・ $x : y : z = 3 \sim 5 : 1 : 3 \sim 7$ の組成が知られている。
- ・製法、製造条件に依存し、様々な化学組成が知られている

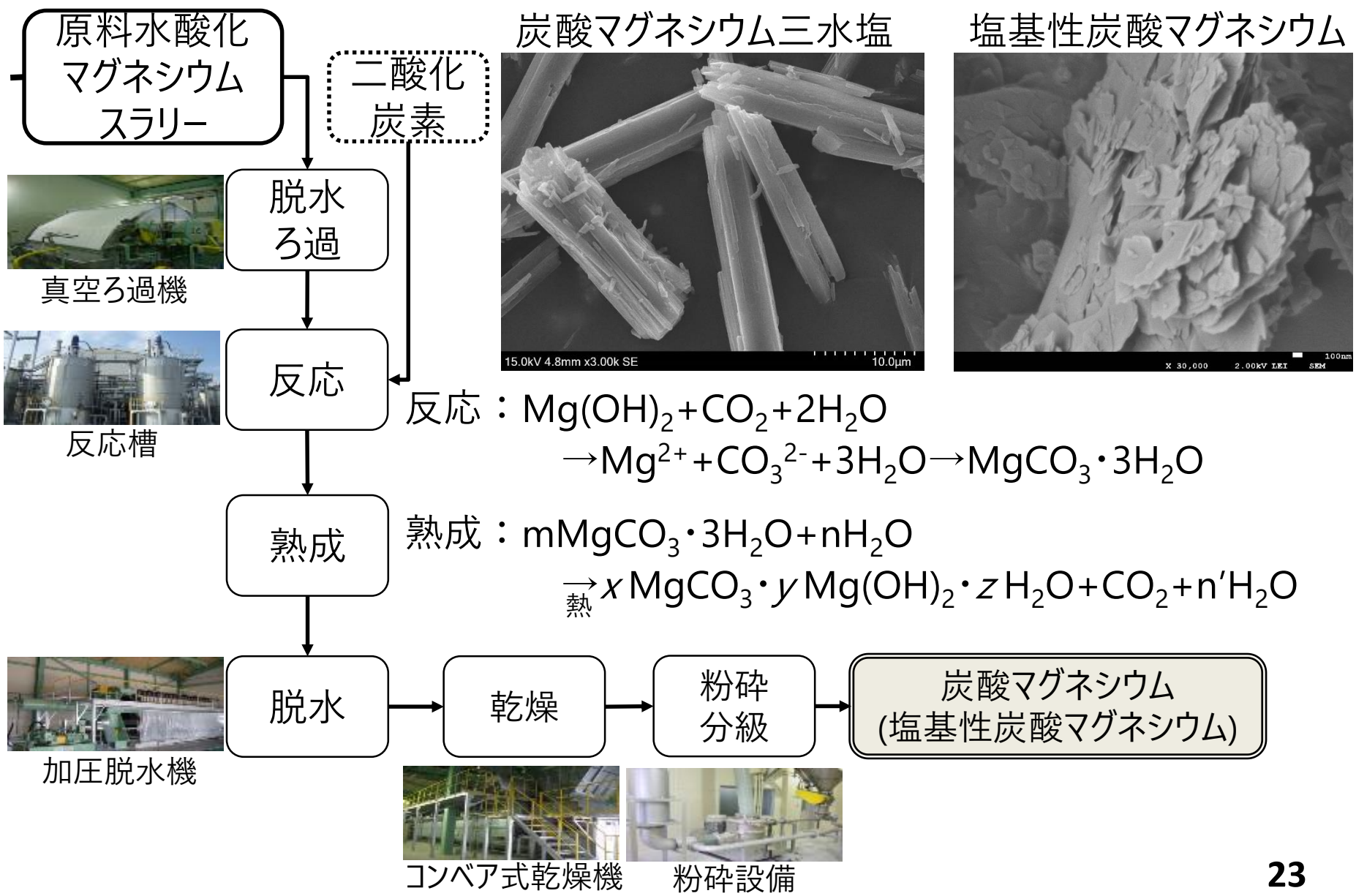
物 性：

- ・アルカリ性の板状結晶
- ・約170°Cで結晶水放出、約350°Cで分解
- ・屈折率が天然ゴムとほぼ同じ





炭酸マグネシウム製造プロセス

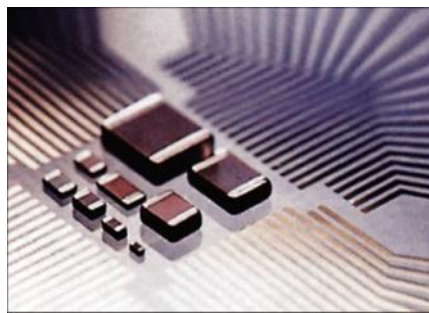




炭酸マグネシウムの使用用途

食品添加物グレード

- ・医薬品原料または原薬原料
- ・固結防止剤(塩etc.)
- ・化粧品や研磨剤(歯磨き)
- ・滑り止め(体操競技・クライミング) 等



工業用グレード

- ・ゴム添加剤
- ・樹脂添加剤
- ・焼成助剤(セラミックコンデンサ)
- ・難燃剤 等





炭酸マグネシウムのグレード

- 工業用 : 粉体物性重視の顧客が多い
- 食品添加物 : 成分規格重視の顧客が多い

種別	当社規格	日本食添	日本薬局方	欧州食添	欧州薬局方	米国食添	米国薬局方
工業用	○						
食品添加物		○					
特定顧客向け	○		○	○			
欧州向け	○			○	○		
北米向け						○	○



ナイカイから世界へ

- 当社炭酸マグネシウムのうち2/3は海外向け
- 海水原料の高純度炭酸マグネシウムは珍しい
→不純物が少ないというアピールポイント





当社取得の認証

- FSSC22000(食品安全) : 塩, 炭酸マグネシウム
- ISO9001(品質) : 全製品
- ISO14001(環境) : 全製品
- HALAL認証 : 全製品
- KOSHER認証 : 全製品
- EU-REACH規則 : 炭酸マグネシウム本登録済

自社商材の付加価値を高め、
販売に繋げるためのツールとして利用



溶存資源の利用について

- ・塩製品、化成品、苦汁に分けて利用率を算出
- ・算出条件：2022年度製造実績

製塩運転日数は330日/年、海水取水量3,000トン/時

化成品運転日数は310～320日/年、海水利用量2,700トン/時

$$\text{利用率(\%)} = \frac{\text{製造実績} \times \text{各溶存資源の換算係数}}{\text{※資源の総存在量}} \times 100$$

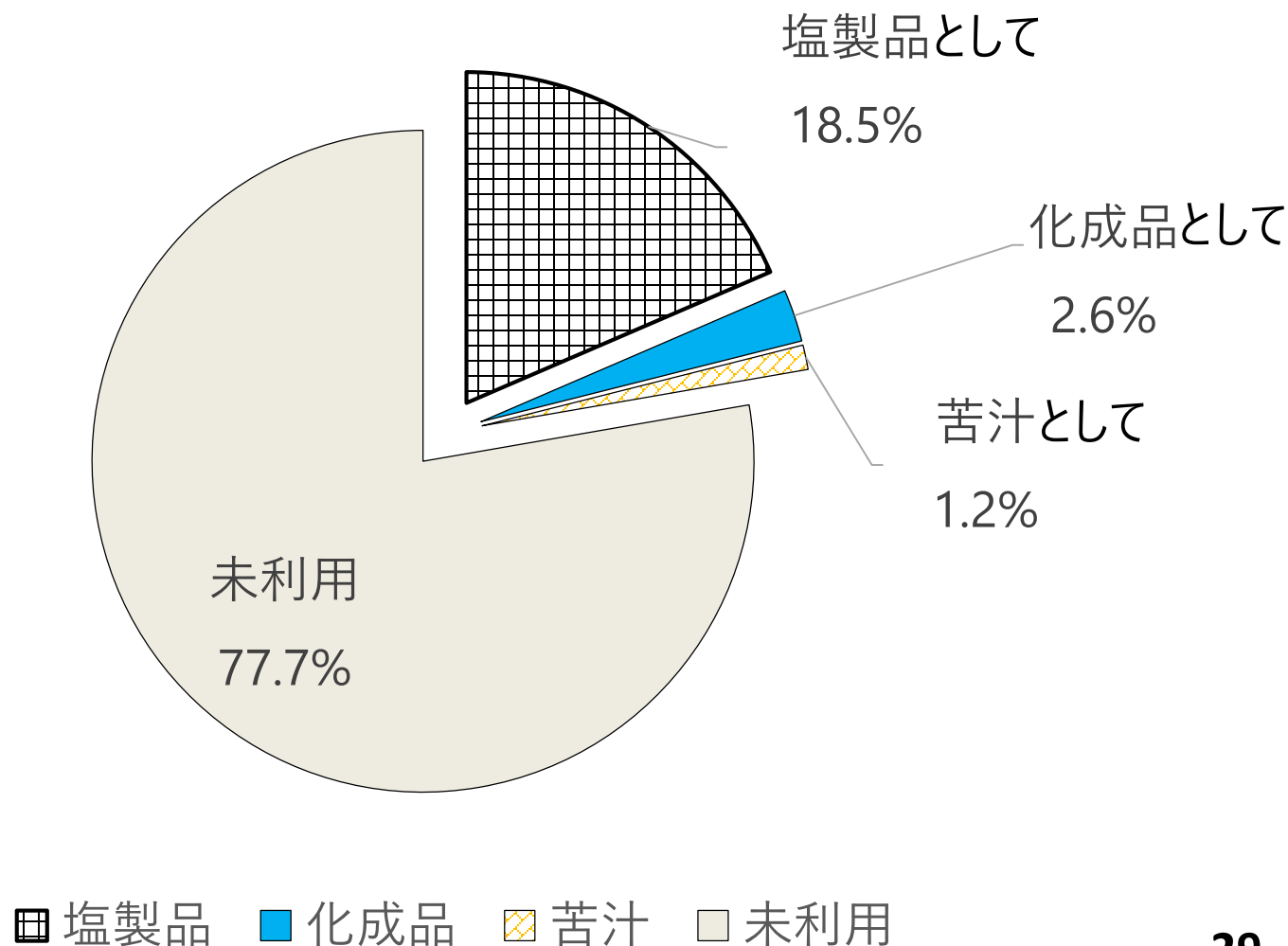
※資源の総存在量

$$\text{主な資源} \left[\begin{array}{ccc} \text{Na}^+ & \text{Cl}^- & \dots \text{塩製品} \cdot \text{苦汁} \\ \text{Mg}^{2+} & \text{K}^+ & \text{Br}^- \dots \text{化成品} \cdot \text{苦汁} \\ \text{Ca}^{2+} & \text{SO}_4^{2-} & \text{HCO}_3^- \end{array} \right] \text{の濃度} \times \text{総海水量}$$



主な溶存資源(全体)の利用状況

- 主な資源の総存在量を100%とした場合、当社ではそのうち塩製品18.5%+化成品2.6%+苦汁1.2%=**22.3%を利用**





溶存資源(個別)の利用率

- 資源毎、個別に利用率を算出(条件は2022年度実績)

$$\text{個別利用率(\%)} = \frac{\text{製造実績} \times \text{各溶存資源の換算係数}}{\text{個別の溶存資源量} \times \text{総海水量}} \times 100$$

	利用形態	個別利用率[%]
Na ⁺	NaCl + 苦汁	24.0
Mg ²⁺	Mg(OH) ₂ + 苦汁	81.1
K ⁺	KCl + 苦汁	16.1
Br ⁻	Br ₂ + 苦汁	20.0
Cl ⁻	主にNaClと苦汁	26.0



逆浸透(RO)膜を用いた海水利用

- 淡水化プロセスにて得られるRO造水→製造に利用
- RO膜の状況把握のため、RO原水(ED希釈海水)とRO造水中の電気伝導度とともにNa, K, Cl, SO₄, Ca, Mgをモニタリング中
- 淡水化プロセスにおける塩除去率は次の式で算出した

$$\text{塩除去率(\%)} = 100 - \left[\left(\frac{\text{RO造水中の塩類}}{\text{RO原水中の塩類}} \right) \times 100 \right]$$

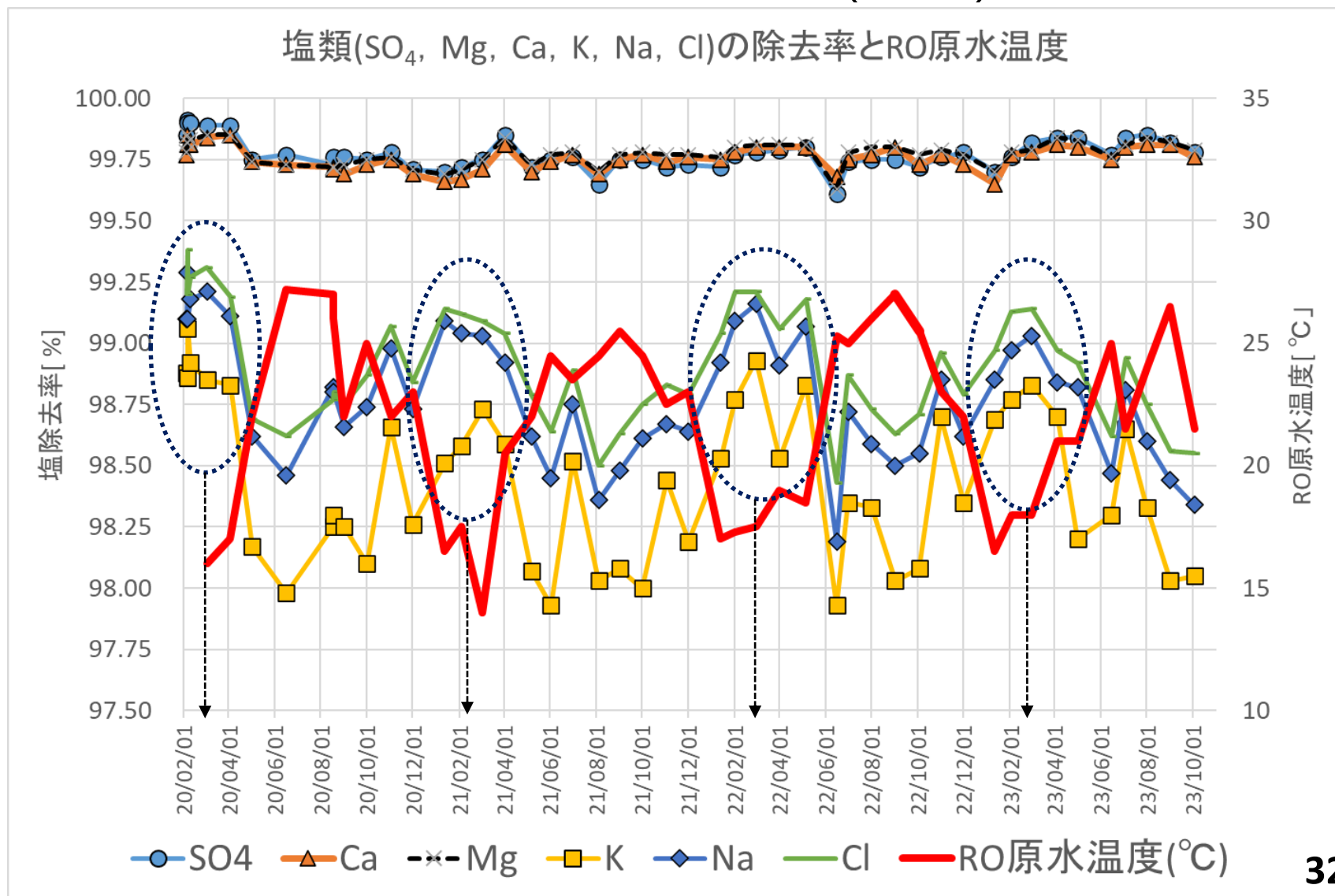


RO造水設備(ナイカイ塩業内)



RO原水・RO造水のモニタリング

- 集計期間：2020年2月～2023年10月(n=46)





今後の展開

- 多能工化・DX：生産性向上
- 化成品9工場のオペレーションを集約＝センター化
- 溶存資源の利用率向上と新規用途創出
- 工場のビルド＆スクラップ



おわりに

- 当社は、これからも変わることなく「品質のナイカイ」「技術のナイカイ」の伝統を大切に、お客様と地域に貢献する企業として、不断の努力を続けていく所存です。

ご清聴ありがとうございました。



イオン交換膜法製塩の技術を活用した 海水综合利用プロセスの検討

Salt & Seawater Science Seminar 2023

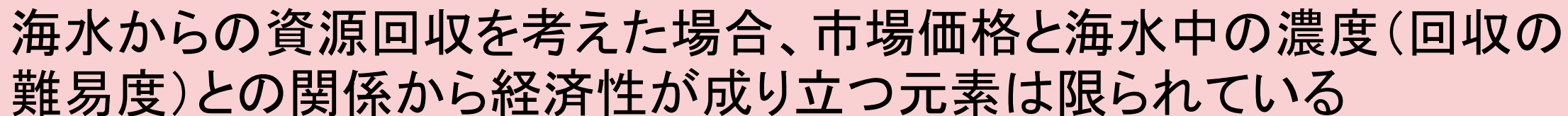
海水総合研究所 加留部智彦

海水中の元素の平均濃度¹⁾(高濃度順に20種類)

	元素名	平均濃度 (mg/kg)		元素名	平均濃度 (mg/kg)
1	塩素	19,350	11	ホウ素	4.5
2	ナトリウム	10,780	12	ケイ素	2.8
3	マグネシウム	1,280	13	酸素	2.8
4	硫黄	898	14	フッ素	1.3
5	カルシウム	412	15	アルゴン	0.62
6	カリウム	399	16	リチウム	0.18
7	臭素	67	17	ルビジウム	0.12
8	炭素	27	18	リン	0.062
9	窒素	8.7	19	ヨウ素	0.058
10	ストロンチウム	7.8	20	バリウム	0.015

海水中には数多くの元素が存在しているが、ほとんどが低濃度である

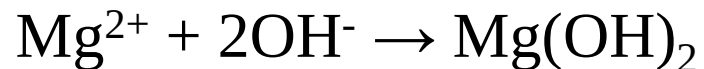
1) 野崎, 日本海水学会誌, 51, 302 – 308(1997)



マグネシウム (Mg)

海水中に1,280 mg/kg 存在

海水に石灰乳 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ スラリー) 等のアルカリを添加し、Mgイオンと反応させて水酸化マグネシウム ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) として回収



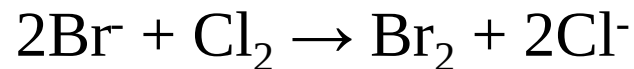
水酸化マグネシウムは、難燃剤、各種マグネシウム塩の原料になる

臭素 (Br)

海水中に67 mg/kg 存在

難燃剤、医薬品等の原料になる

海水を酸性にし、塩素 (Cl_2) を吹き込むことによって臭素を遊離



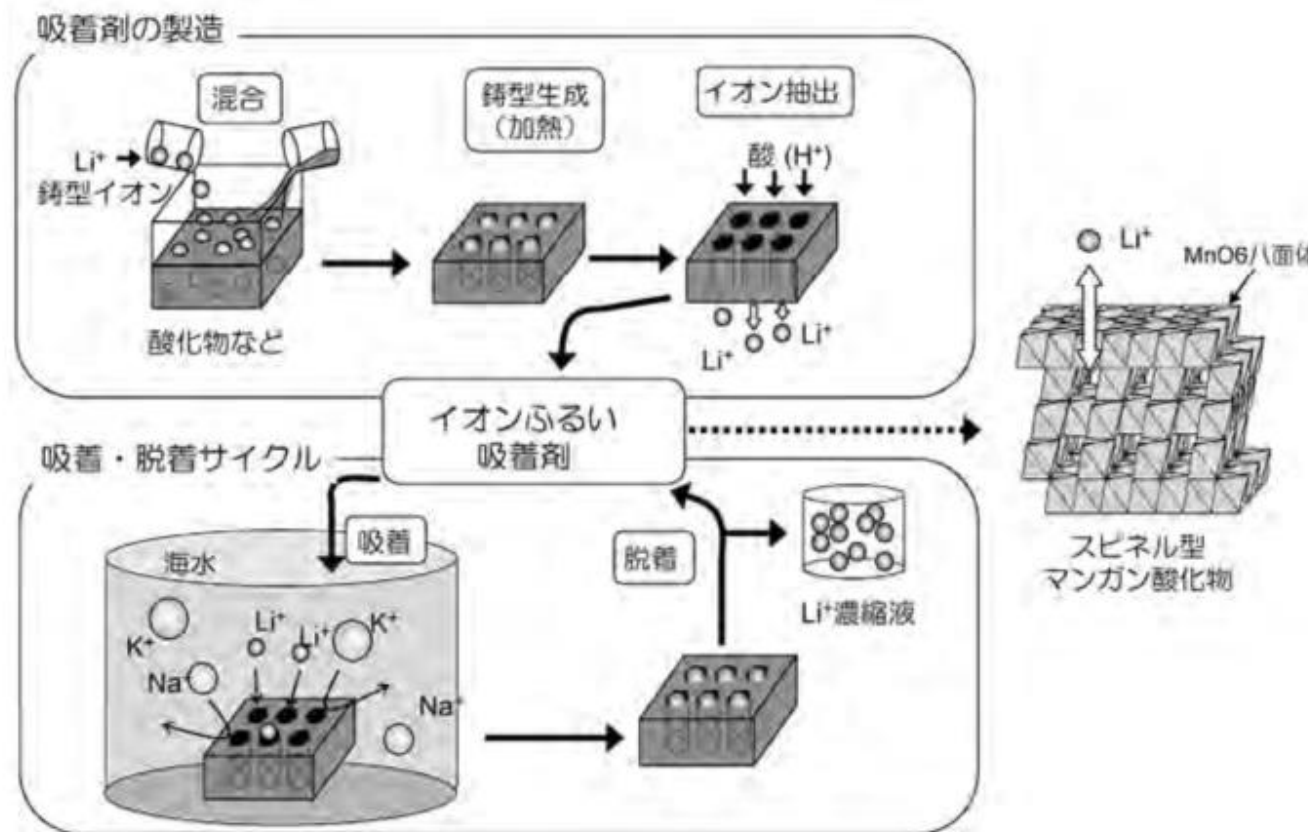
発生塔の上部から、遊離臭素を含む海水を流下させ、下部から多量の空気を送り、臭素を空気中に追い出したのち、臭素－空気の混合ガスから臭素を回収

海水からの回収が研究されてきた溶存資源例

リチウム (Li)

海水中に0.18 mg/kg 存在

リチウムイオン電池の原料等を使用
吸着材としてスピネル型マンガン酸化物
を使用して、海水から回収する方法²⁾が
検討されている



2) 大井, 地質ニュース670号, 60 – 69(2010)

海水からの回収が研究されてきた溶存資源例

ウラン(U)

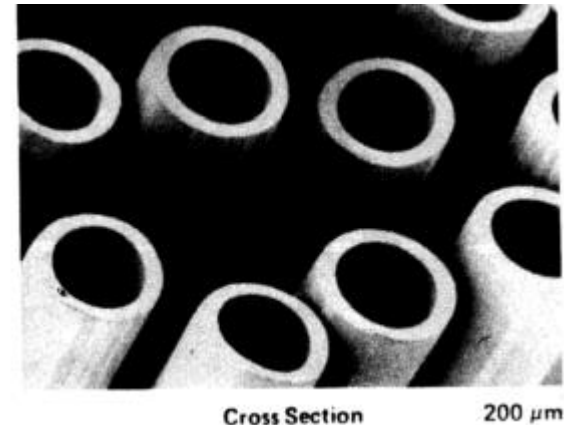
海水中に0.0032 mg/kg 存在

原子力発電用燃料に使用

海水ウランの採取のために、多くの吸着材が研究されている

無機系では含水酸化チタン、有機系ではアミドキシム樹脂がすぐれている³⁾

グラフト重合によって、中空糸繊維にアミドキシム基を導入する検討も実施されている⁵⁾



アミドキシム樹脂によるウランの捕集⁴⁾

3) 海水の科学と工業, 525 – 532(1994)

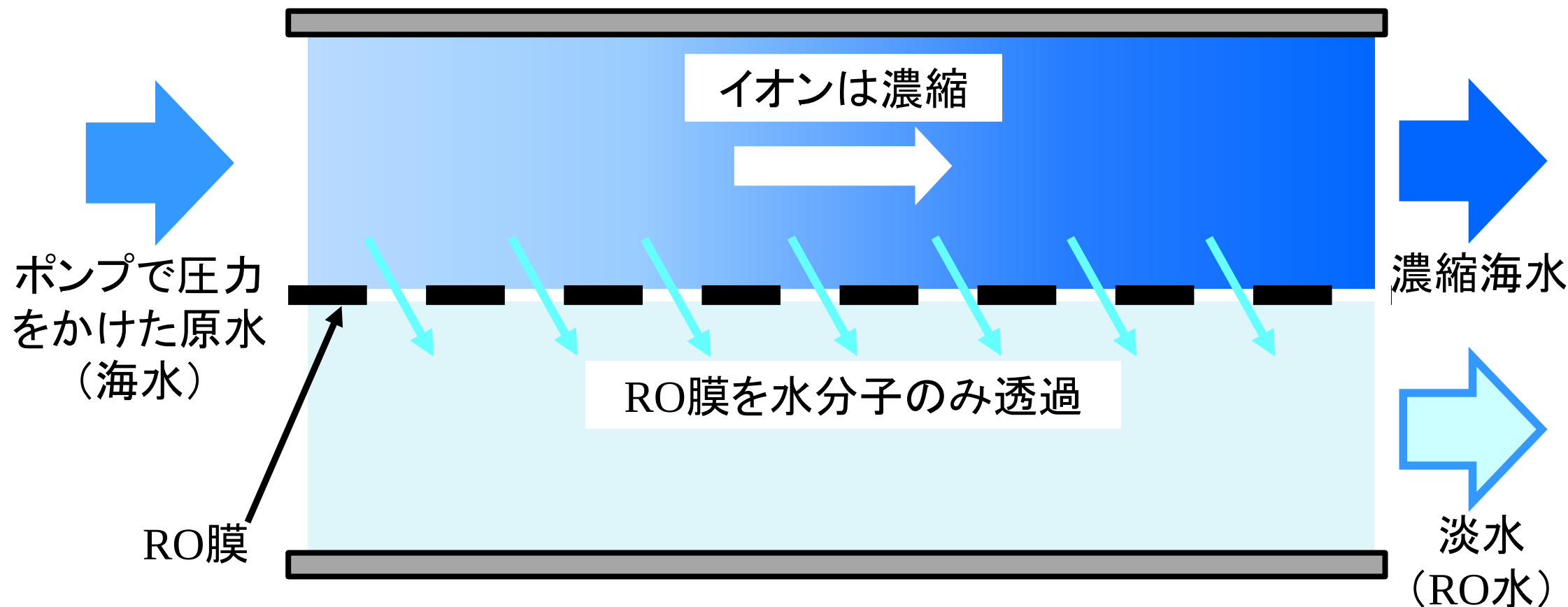
4) 国立研究開発法人 量子科学技術研究機構HP, <https://www.qst.go.jp/site/kankyau/28708.html>

5) 須郷ら, 膜, 13, 272 – 282(1988)

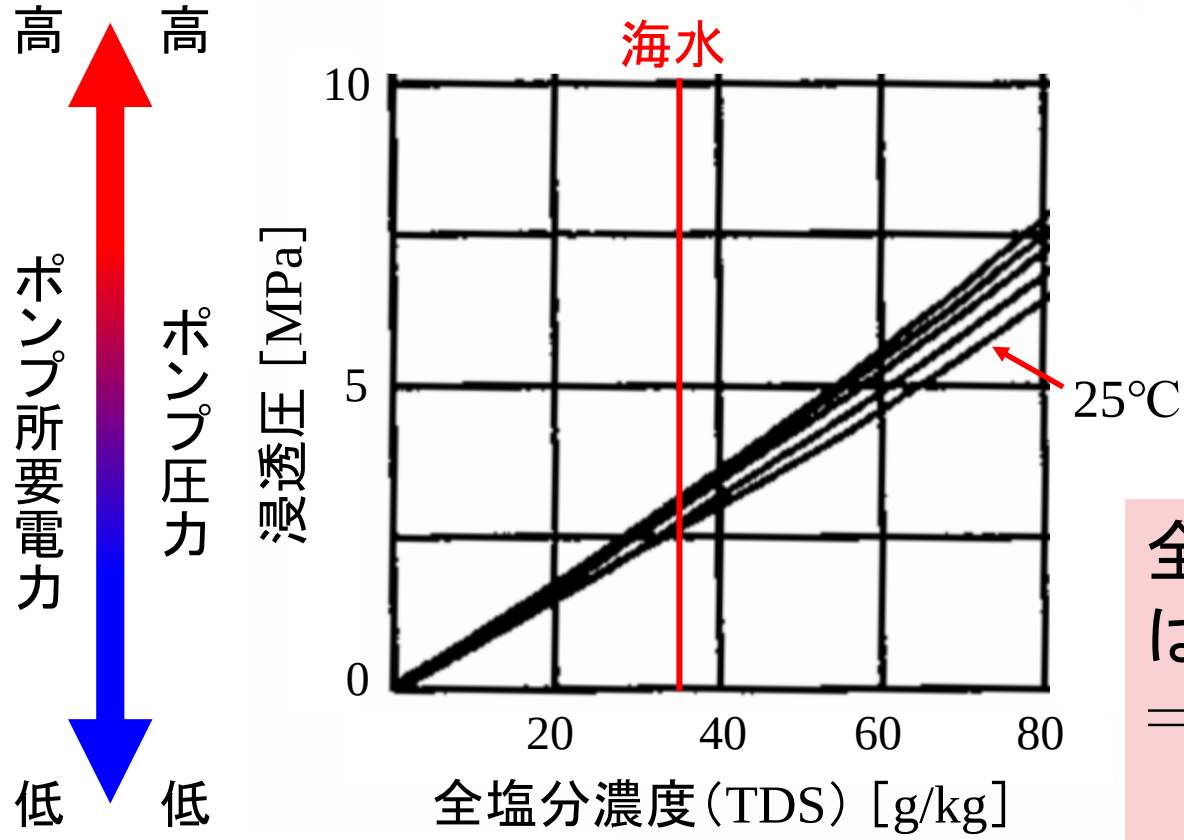
海水中に存在する元素について、様々な回収技術が研究されてきたが、**単体での回収**が経済的に成り立つ元素は少ない

海水中のより多くの資源について、回収を経済的に成立させるためには、**回収コストの低減**が必要
一つの方法として、海水淡水化と資源回収を組み合わせた、海水総合利用プロセスの利用が考えられる

そこで、逆浸透(RO)膜法海水淡水化とイオン交換膜電気透析(ED)法海水濃縮を組み合わせた、海水総合利用プロセスの経済性について検討した



海水に浸透圧以上の圧力をかけてRO膜面に供給し、水のみを透過させて淡水 (RO水) を生成する

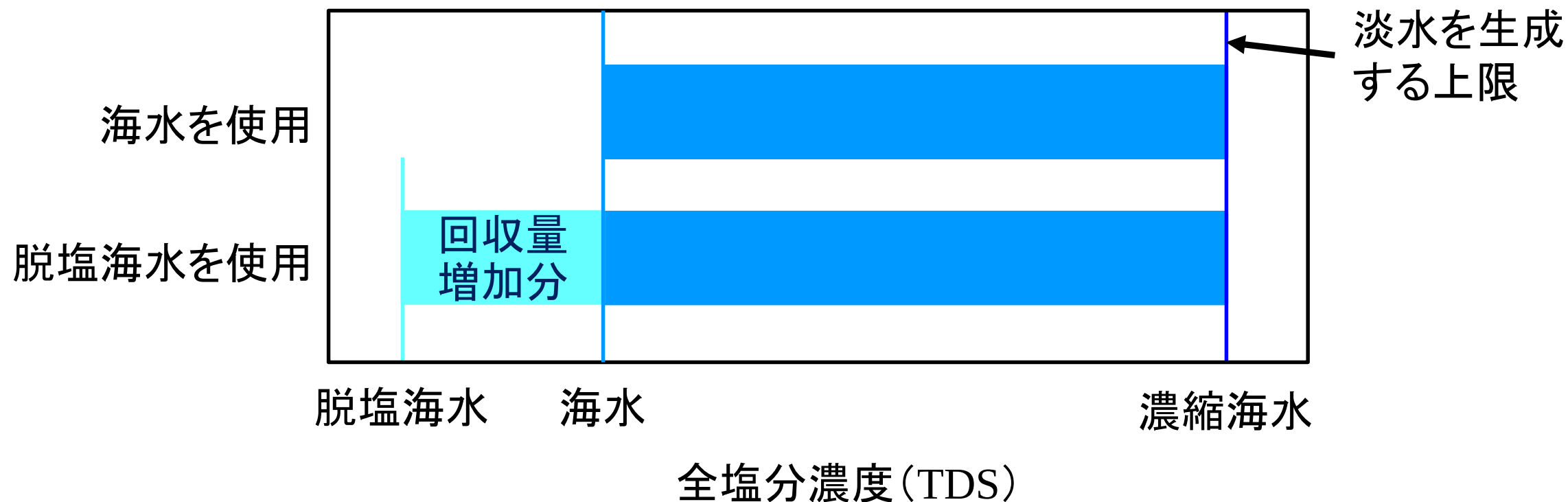


海水、蒸発法かん水(濃縮海水)の浸透圧⁶⁾

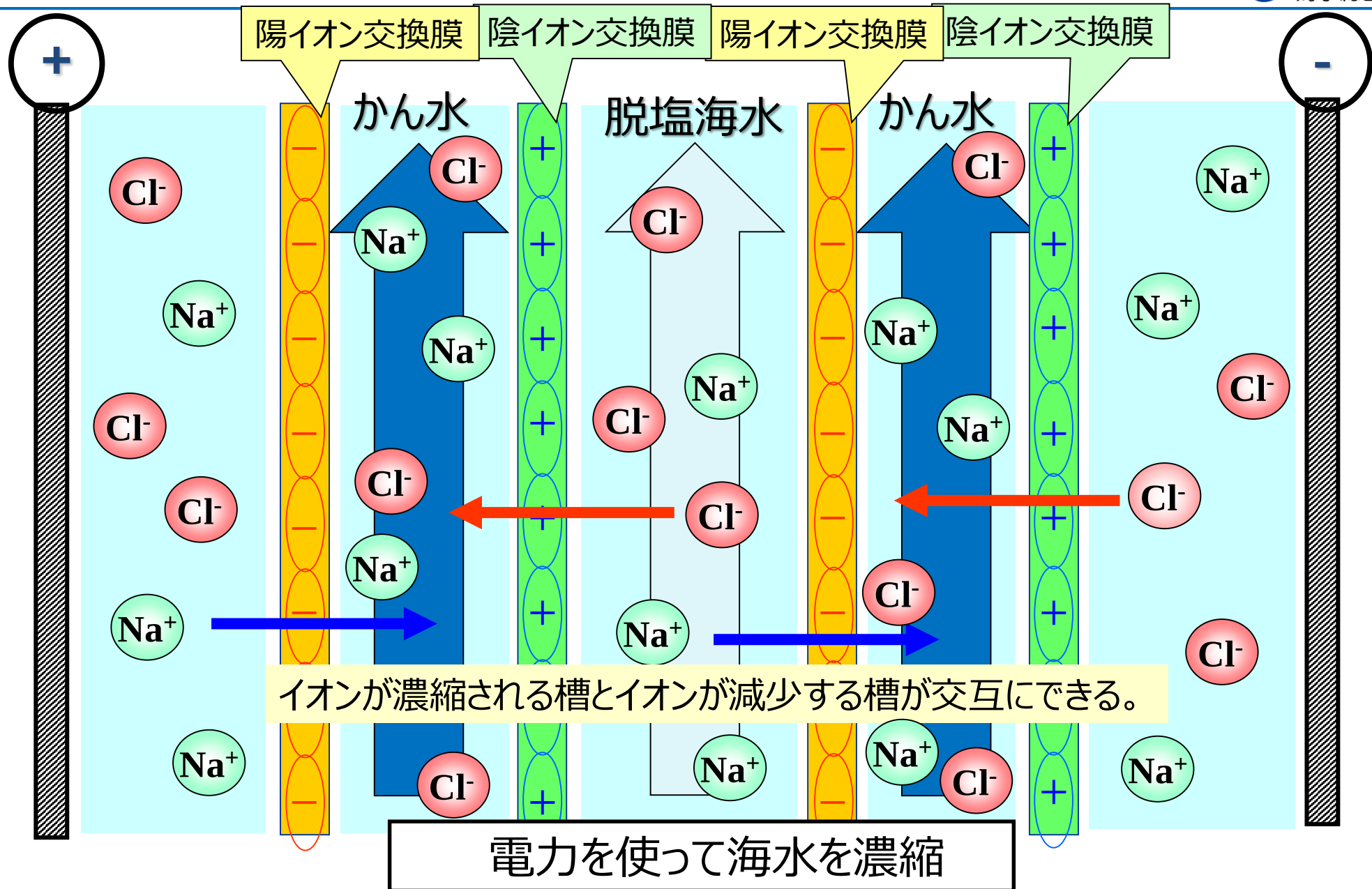
全塩分濃度(TDS)が低いほど浸透圧は低い
⇒ RO膜法海水淡水化において、**TDSが低い海水(脱塩海水)**を使用すると、**所要電力が低く、エネルギーコストは低い**

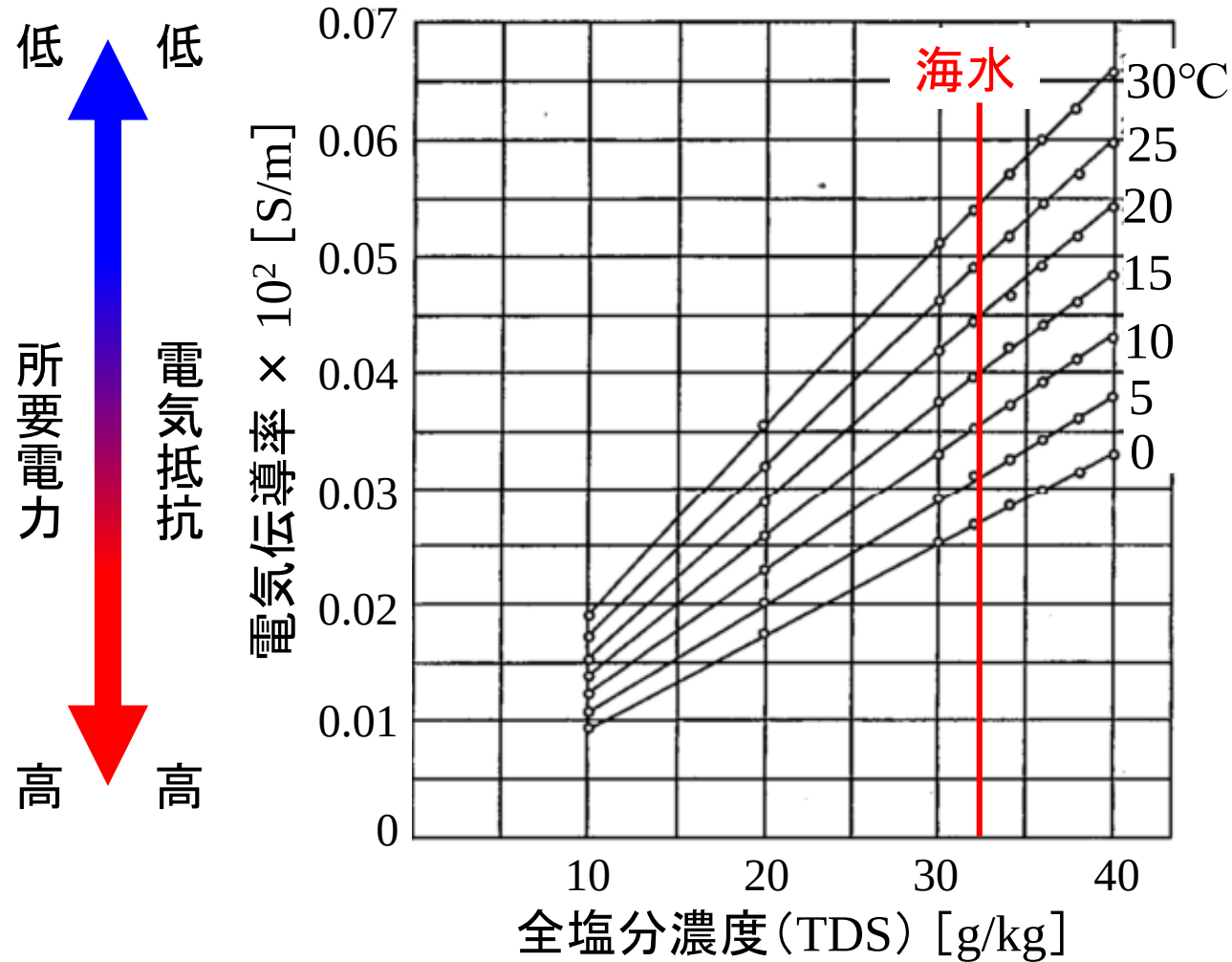
6) 公益財団法人 塩事業センター, 海水と製塩-データブック-(2006)(低濃度側を抜粋)

使用する海水濃度が異なる場合の淡水回収量



濃縮海水のTDSを一定とした場合
TDSが低い脱塩海水を使用すると淡水の回収量は増加



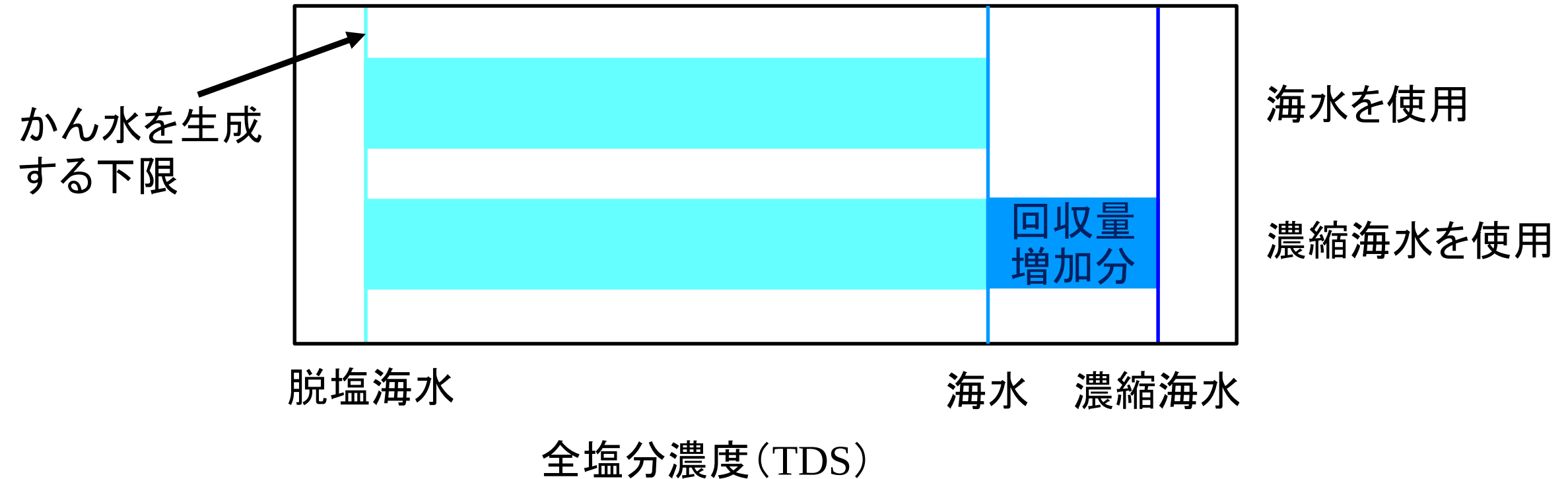


海水の電気伝導率⁷⁾

全塩分濃度 (TDS) が高いほど
電気抵抗は低い
⇒ EDにおいて、**TDSが高い海水**
(**濃縮海水**)を使用すると、所要
電力が低く、**エネルギーコストは**
低い

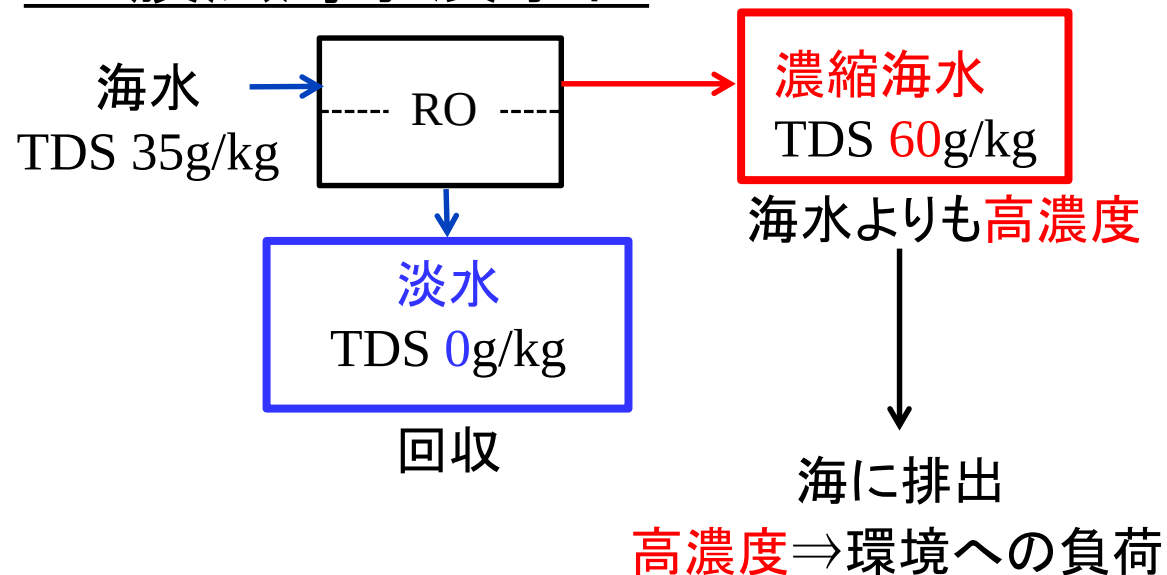
7) 公益財団法人 塩事業センター, 海水と製塩-データブック-(2006)

使用する海水濃度が異なる場合のNaCl回収量

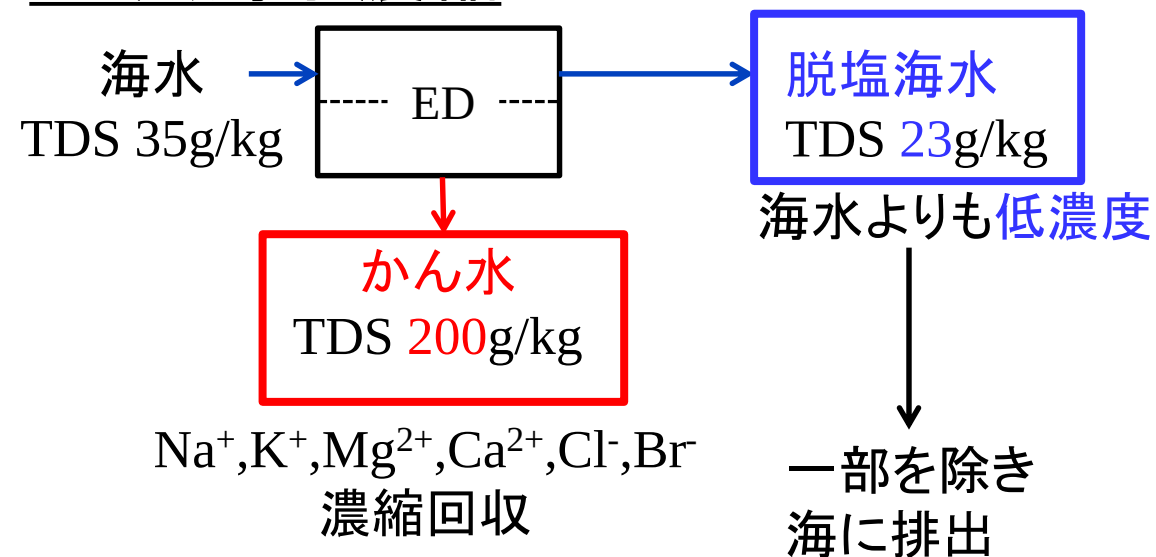


脱塩海水のTDSを一定とした場合
TDSが高い濃縮海水を使用するとNaClの回収量は増加

RO膜法海水淡水化



ED法海水濃縮



現行：海水⇒淡水

原水に海水よりもTDSの低い脱塩海水を使用すると、エネルギー削減、淡水回収量増加

現行：海水⇒かん水

原水に海水よりもTDSの高い濃縮海水を使用すると、エネルギー削減、NaCl回収量増加

RO膜法海水淡水化とED法海水濃縮を上手く組み合わせると、エネルギー削減となり、効率的⁸⁾

8) 長谷川ら, 日本海水学会60周年記念シンポジウム (2011)他

RO膜法淡水化とED法海水濃縮を組み合わせた海水総合利用プロセスにおいて、**所要エネルギー、淡水、NaClの回収量**等について検討した

RO膜法淡水化とED法海水濃縮の統合

- **一過流型プロセス**

- 循環型プロセス

 - 循環型プロセスの課題

 - 排水をともなう循環型プロセス

 - 完全循環型プロセス

海水処理能力10万t/日のRO膜法淡水化、ED法海水濃縮を組み合わせた場合の試算を実施

試算条件

RO 排出される濃縮海水のTDS: 60g/kg

ED 陽イオン交換膜: 2価イオン透過性膜

陰イオン交換膜: 2価イオン難透過性膜

生成されるかん水のTDS: 200g/kg

排出される脱塩海水のTDS: 23g/kg

評価指標

RO水生産量 [t / 日]

RO水の生産量

NaCl回収量 [t / 日]

かん水中に回収するNaClの量

RO電力原単位 [kWh / t-水]

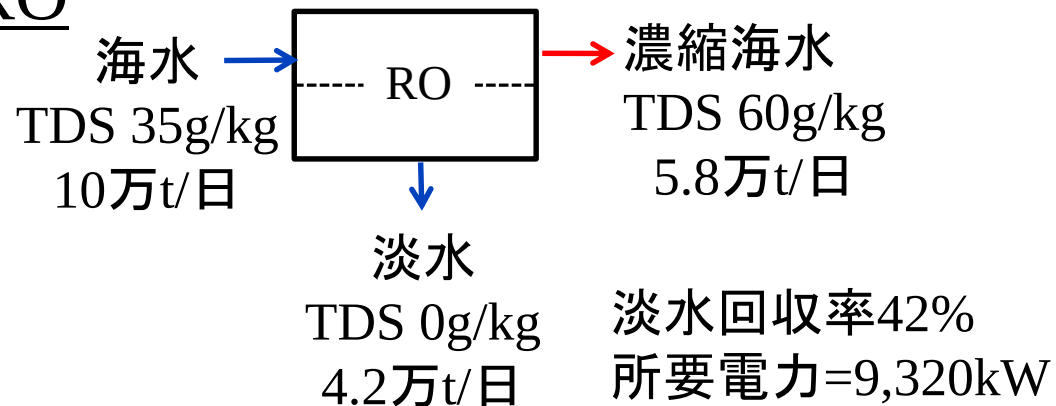
RO水1 t の回収に必要なポンプの電力量

ED電力原単位 [kWh / t-塩]

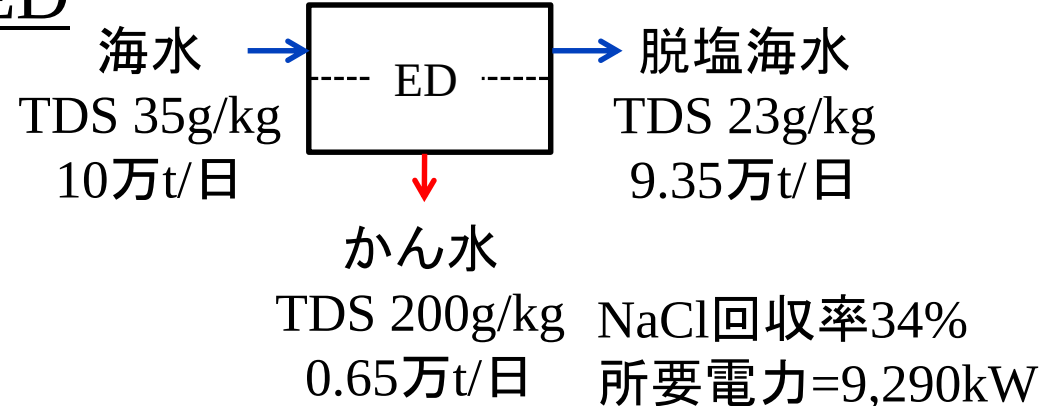
NaCl 1 t の回収に必要な透析電力量

RO膜法淡水化、ED法海水濃縮単独での運転

RO

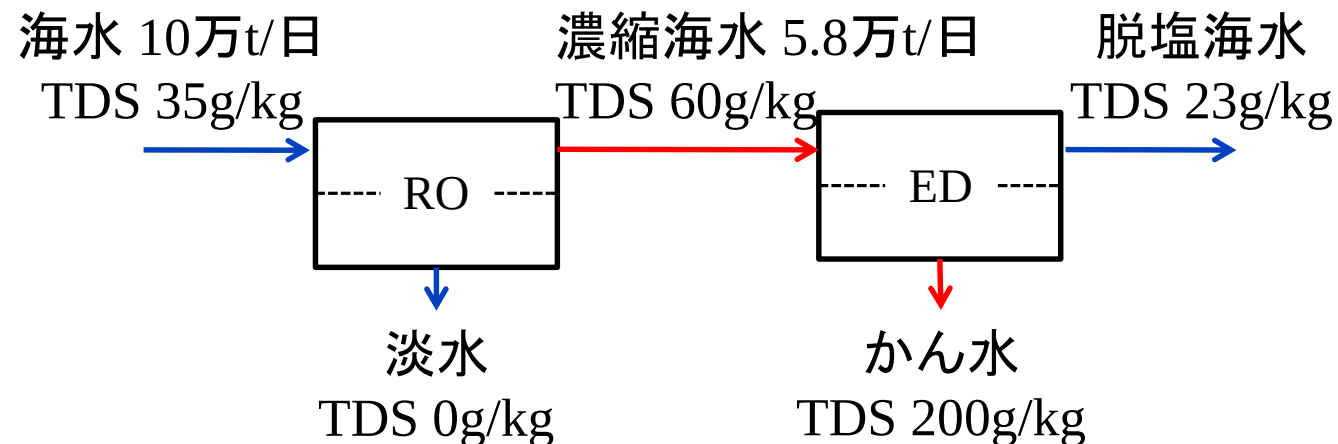


ED



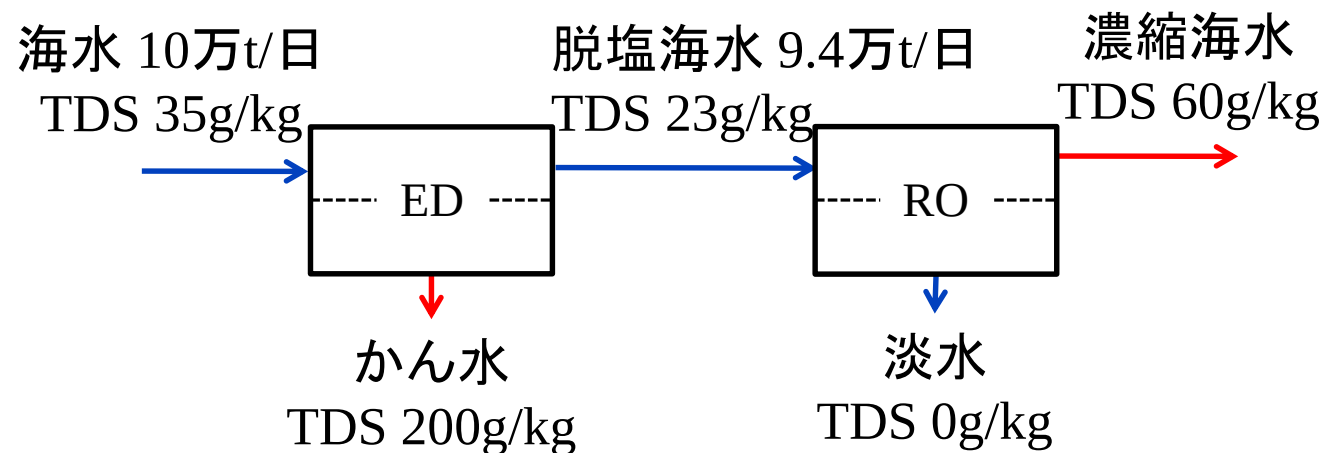
	単位	RO単独	ED単独
処理水(海水)量	t/日	100,000	100,000
RO水生産量	t/日	42,400	-
RO電力原単位	kWh/t-水	5.3	-
NaCl回収量	t/日	-	925
ED電力原単位	kWh/t-塩	-	241

RO+ED一過流型（濃度は設定値）



RO 水回収率*1	1.00倍
電力原単位*1	1.00倍
ED NaCl回収率*2	2.06倍
電力原単位*2	0.87倍

ED+RO一過流型（濃度は設定値）



ED NaCl回収率*2	1.00倍
電力原単位*2	1.00倍
RO 水回収率*1	1.46倍
電力原単位*1	0.70倍

*1 RO単独との比較

*2 ED単独との比較

一過流型では、後段設備において効率が向上する

RO膜法淡水化とED法海水濃縮を組み合わせた海水総合利用プロセスにおいて、**所要エネルギー、淡水、NaClの回収量**等について検討した

RO膜法淡水化とED法海水濃縮の統合

- ・ 一過流型プロセス

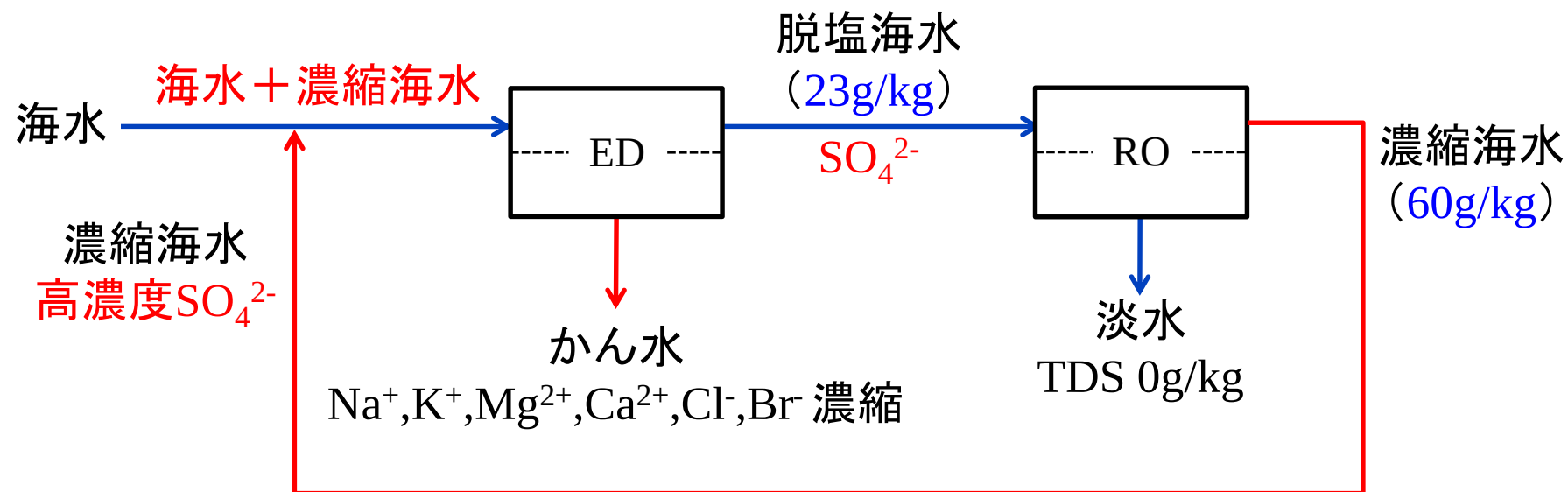
- ・ **循環型プロセス**

循環型プロセスの課題

排水をともなう循環型プロセス

完全循環型プロセス

一過流型では後段設備のみ効率が良くなる
⇒循環型にすると、前段も後段も効率が良くなると考えられる



ただし、 SO_4 イオンは系外に排出できないため高濃度となり、石膏(CaSO_4)が析出する可能性がある

RO膜法淡水化とED法海水濃縮を組み合わせた海水総合利用プロセスにおいて、**所要エネルギー、淡水、NaClの回収量**等について検討した

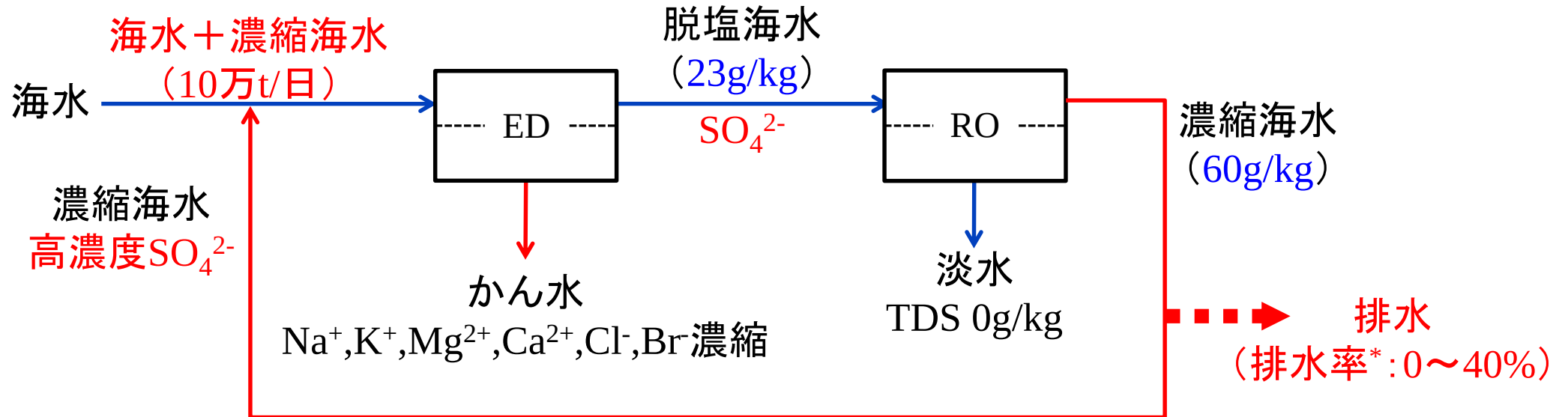
RO膜法淡水化とED法海水濃縮の統合

- ・ 一過流型プロセス
- ・ 循環型プロセス

循環型プロセスの課題

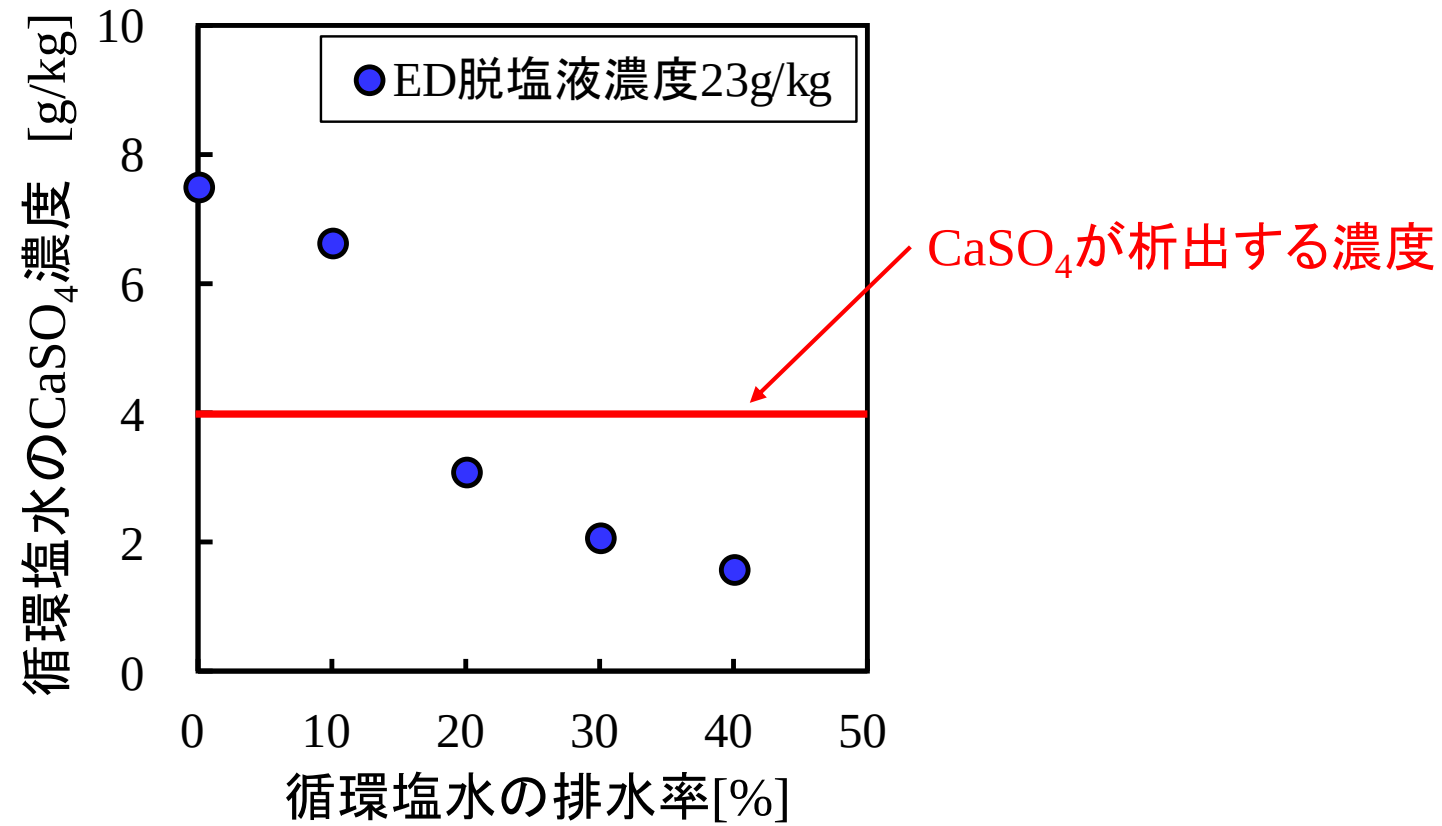
排水をともなう循環型プロセス

完全循環型プロセス



*排水率 = 排水量 ÷ 循環塩水(循環する濃縮海水)の量 × 100

循環塩水(濃縮海水)を一部排水することで、 SO_4 イオン濃度の増加を抑制してはどうか？



CaSO₄は濃度が4g/kgを超えると析出すると仮定⁹⁾すると、循環塩水の20%以上を排出することで析出を抑制できると考えられる

9) 曾我, 長南, 小試報告 11, 115(1966)

	単位	RO単独	ED単独	ED+RO循環 (循環水20%排水)
取水海水量	t/日	100,000	100,000	73,000
処理水量(循環水+海水)	t/日	100,000	100,000	100,000
RO水生産量 ^{*1}	-	1.00	-	1.30
RO電力原単位 ^{*1}	-	1.00	-	0.59
NaCl回収量 ^{*2}	-	-	1.00	1.74
ED電力原単位 ^{*2}	-	-	1.00	0.95

回収量向上

原単位削減

*1 RO単独との比較
*2 ED単独との比較

循環塩水の20%を排出するED+RO循環型プロセスにより、省エネルギー化が達成できると期待できる
しかし、排出する循環塩水は高濃度⇒環境への負荷が懸念

RO膜法淡水化とED法海水濃縮を組み合わせた海水総合利用プロセスにおいて、**所要エネルギー、淡水、NaClの回収量**等について検討した

RO膜法淡水化とED法海水濃縮の統合

- ・ 一過流型プロセス
- ・ 循環型プロセス

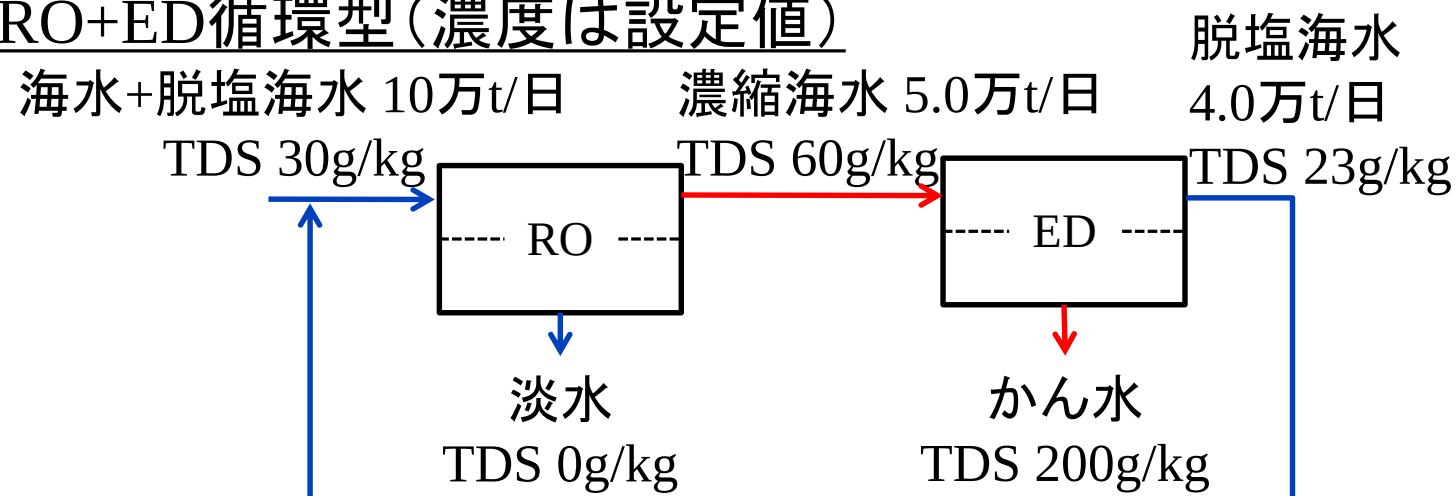
循環型プロセスの課題

排水をともなう循環型プロセス

完全循環型プロセス

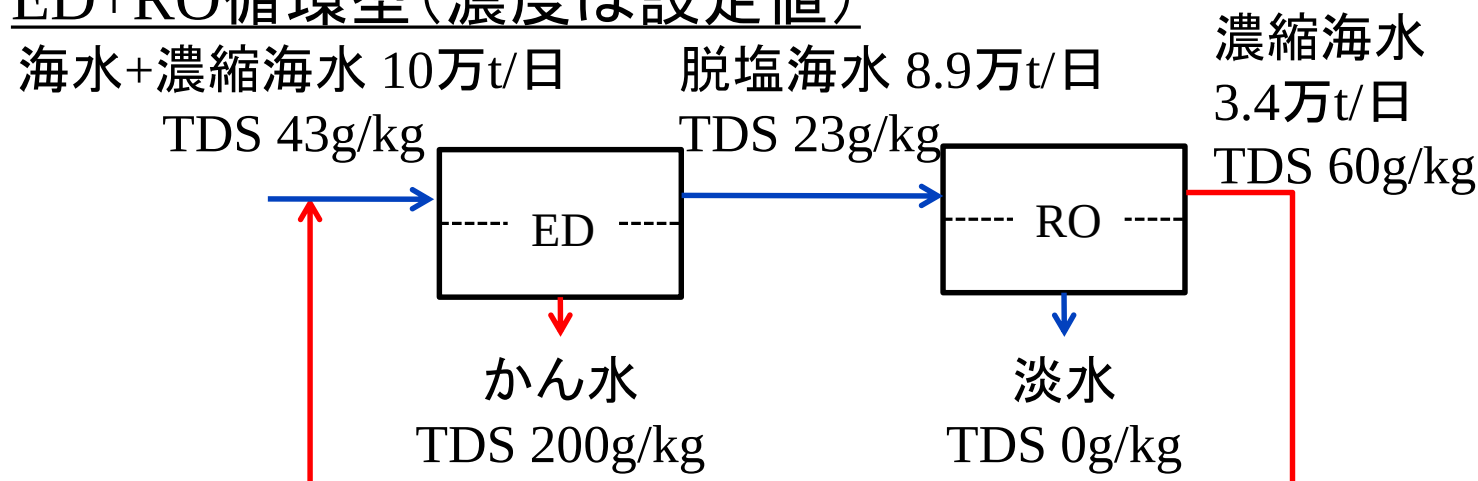
SO₄イオンの除去が可能になり、完全循環型プロセスが成立すると？

RO+ED循環型（濃度は設定値）



RO 水回収率*1	1.19倍
電力原単位*1	0.78倍
ED NaCl回収率*2	2.03倍
電力原単位*2	0.78倍

ED+RO循環型（濃度は設定値）



ED NaCl回収率*2	1.57倍
電力原単位*2	0.84倍
RO 水回収率*1	1.46倍
電力原単位*1	0.46倍

*1 RO単独との比較

*2 ED単独との比較

循環型では、前段設備における効率も向上

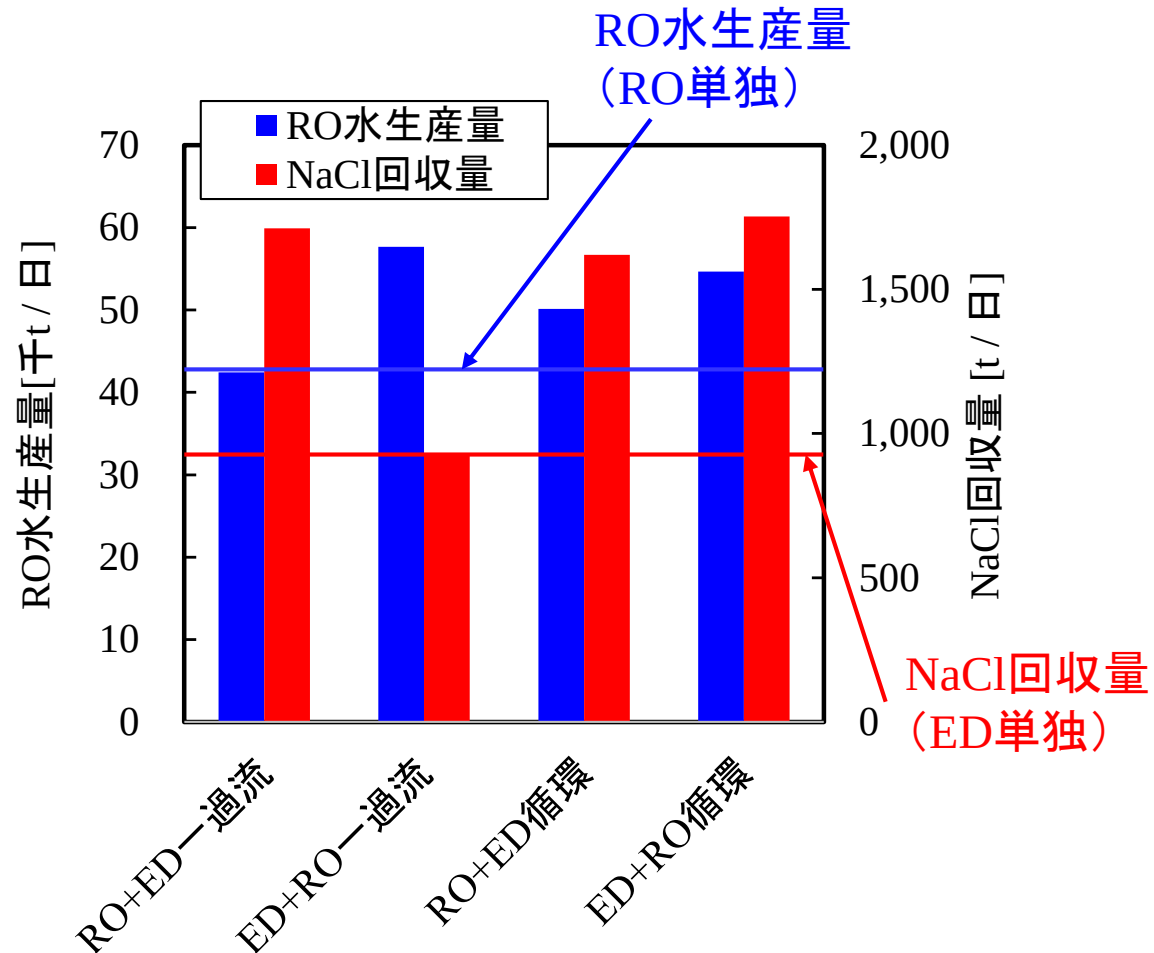
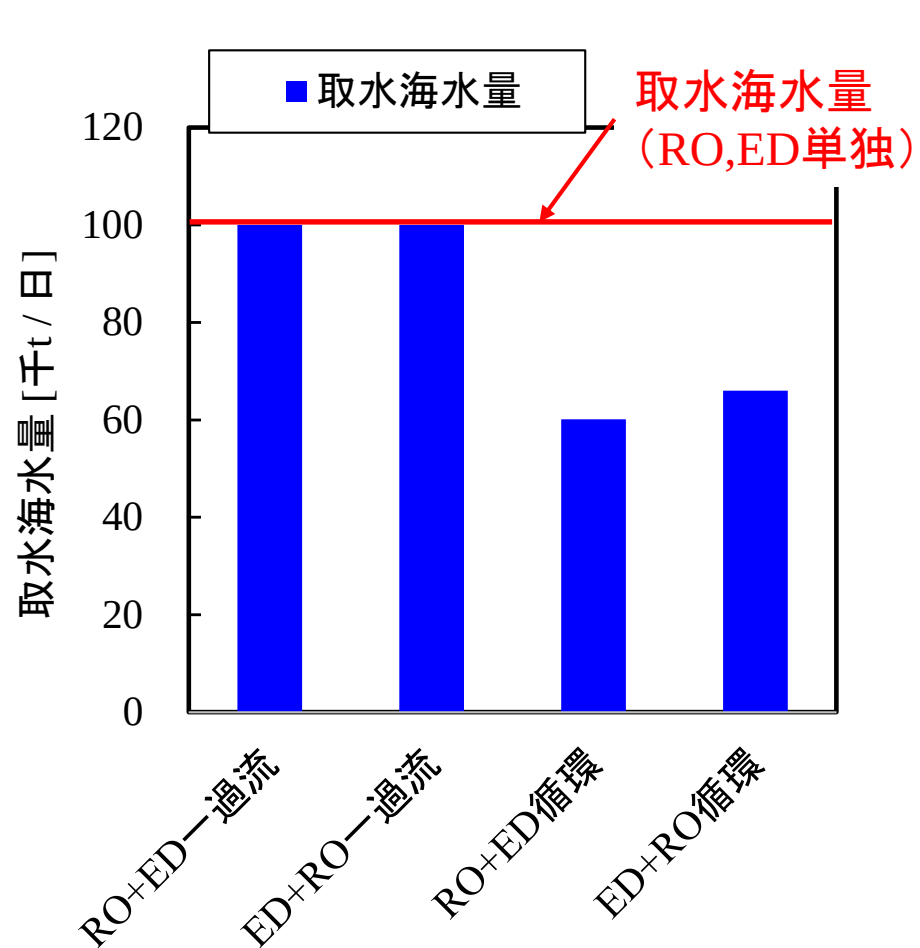
	単位	RO単独	ED単独	ED+RO循環 (循環水20%排水)	ED+RO循環
取水海水量	t/日	100,000	100,000	73,000	66,000
処理水量(循環水+海水)	t/日	100,000	100,000	100,000	100,000
RO水生産量 ^{*1}	-	1.00	-	1.30	1.29
RO電力原単位 ^{*1}	-	1.00	-	0.59	0.46
NaCl回収量 ^{*2}	-	-	1.00	1.74	1.90
ED電力原単位 ^{*2}	-	-	1.00	0.95	0.84

回収量向上

原単位削減

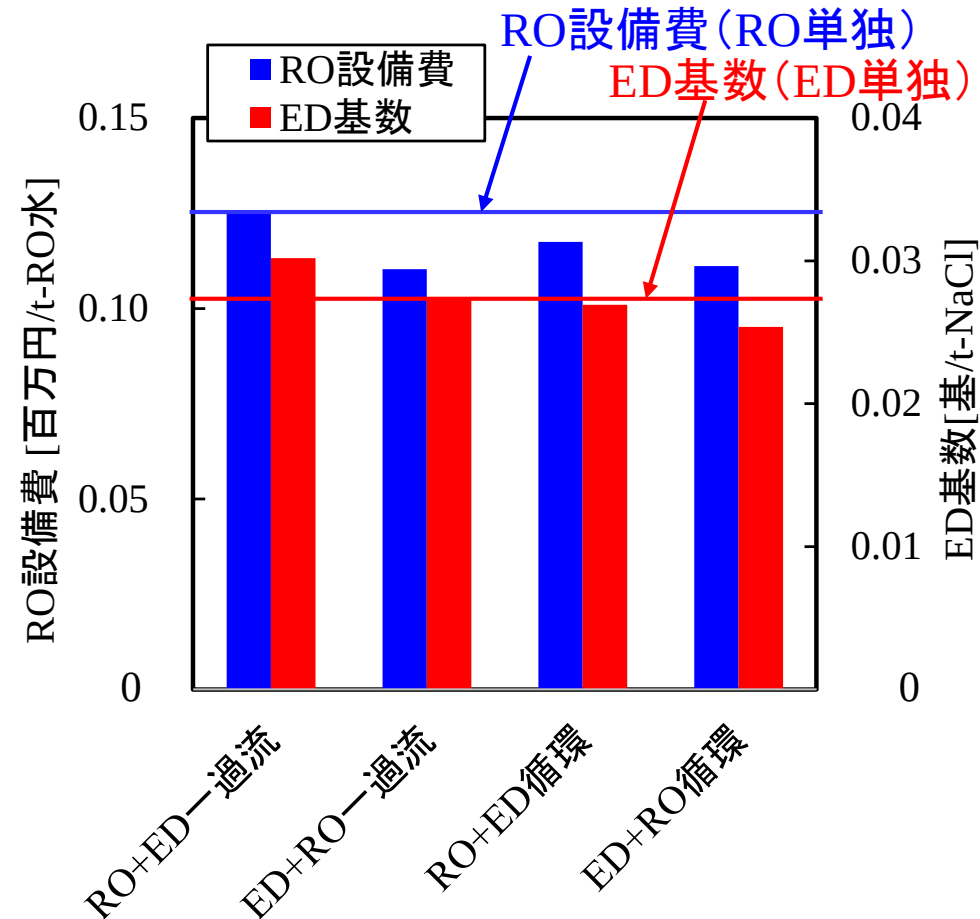
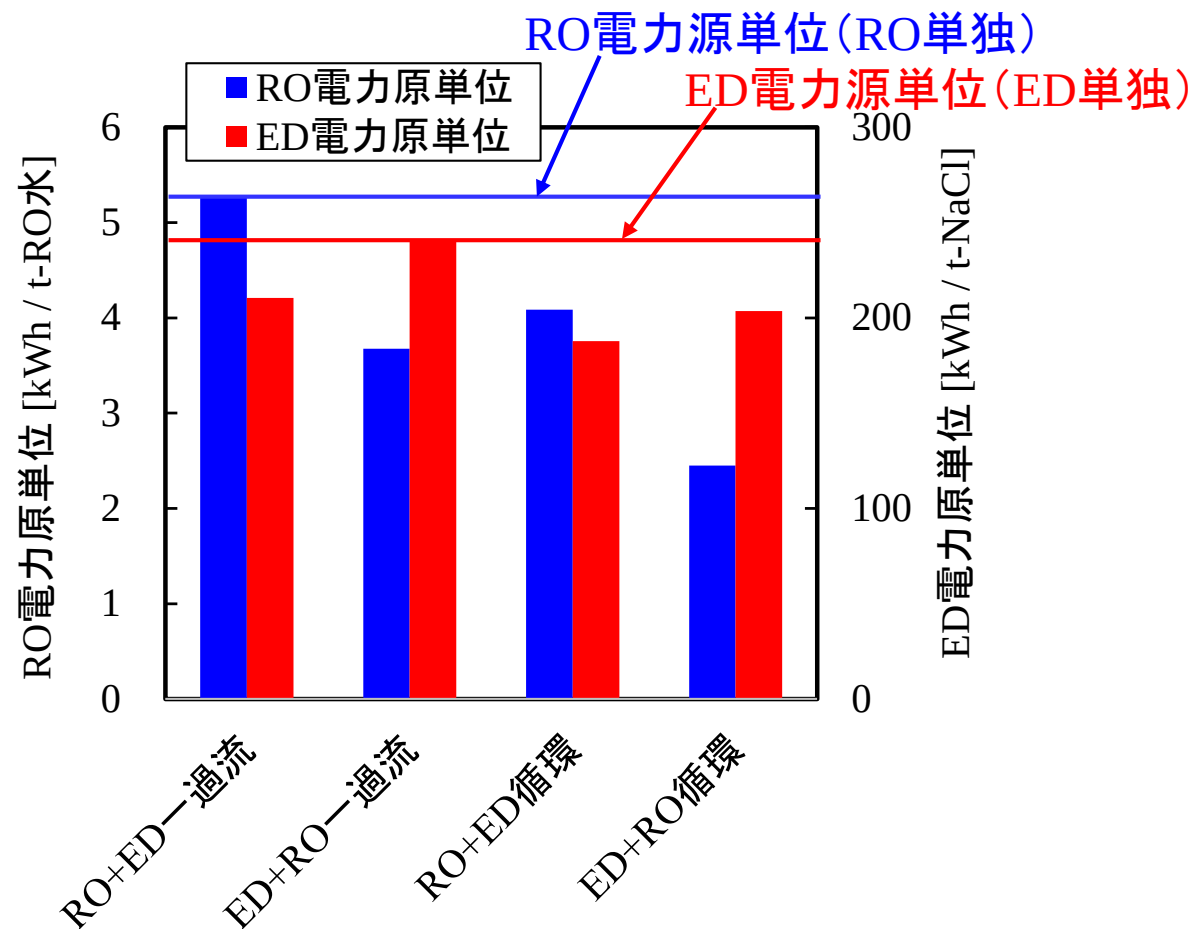
*1 RO単独との比較
*2 ED単独との比較

ED+RO完全循環型プロセスの方が、循環塩水の20%を排出するプロセスより、省エネルギー化が達成できると期待できる

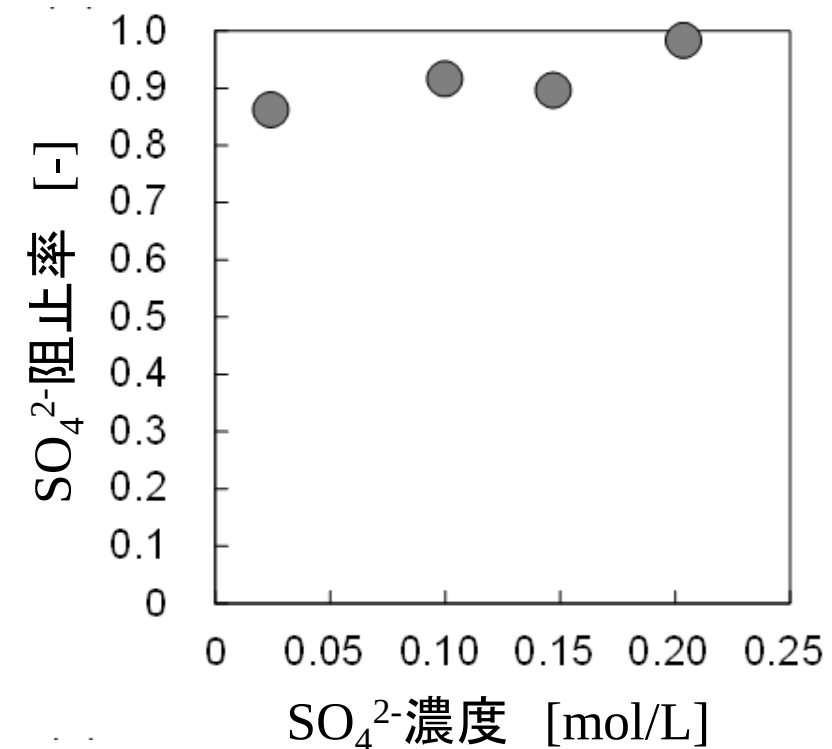
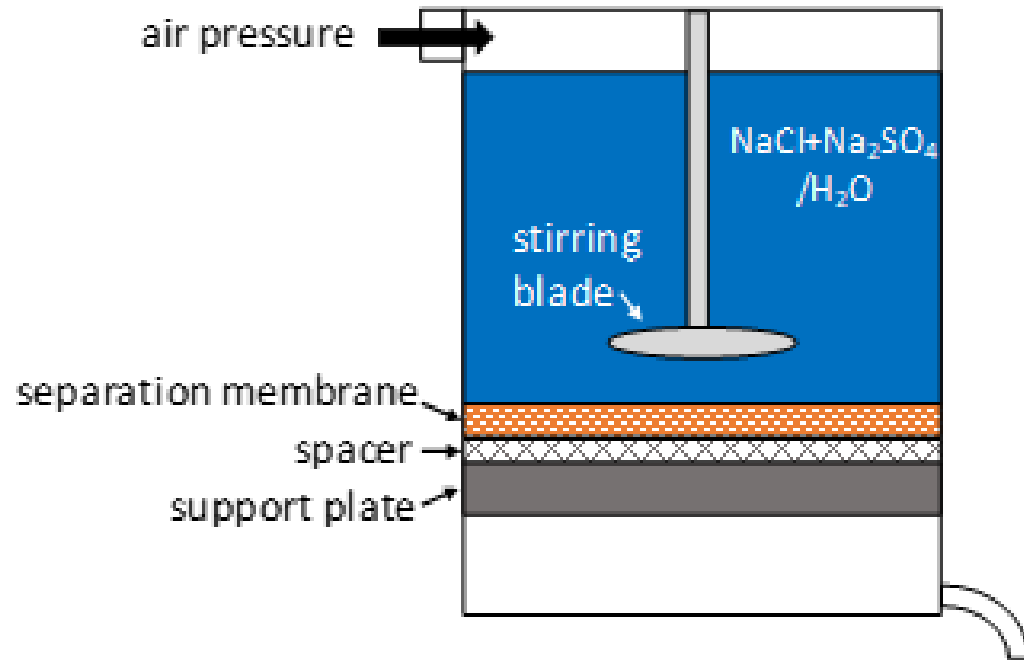


- ・ 取水海水量は循環型では大幅に減少
- ・ 生産量は一過流型では後段設備が、循環型では両者ともに増加
- ・ 循環型の生産量を比較すると、ED+RO循環型の方が若干多い

完全循環型プロセスによる経済性への影響



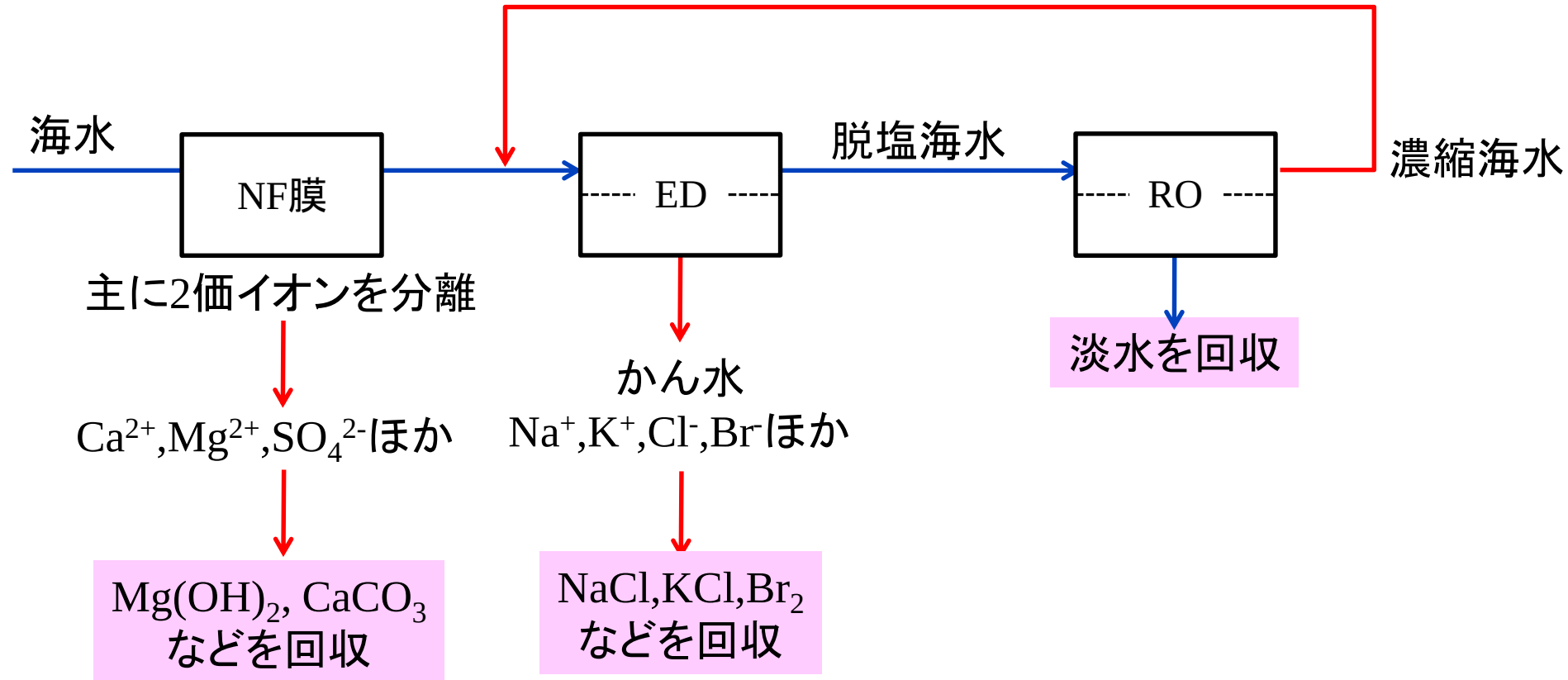
- 電力原単位は一過流型では後段設備で抑制され、循環型では両者ともに抑制される
- 特に ED+RO循環型のRO電力原単位抑制効果が顕著である
- 淡水量当たりのRO設備費(昇圧ポンプ+モジュール)は淡水生産量が多いほど低い
- ED基数には大きな差はないが、循環型の方が少なくなる



Na_2SO_4 溶液+3mol/L NaCl溶液における SO_4^{2-} の阻止率¹⁰⁾

NF膜を使用すると、海水中の SO_4 イオンを選択的に分離除去することが可能

10) 高橋ら, 日本海水学会誌, 76, 233 – 237 (2022)



NF膜を使用することで、

- 前段設備、後段設備ともに効率の良い循環型が達成できる可能性
- 濃縮海水の放出が必要ない可能性⇒海洋の環境負荷を軽減

逆浸透膜法海水淡水化とイオン交換膜電気透析法海水濃縮を
組み合わせた海水総合利用プロセスの経済性について検討した

- 循環塩水の20%を排出するED+RO循環型プロセスにより、省エネルギー化が達成できると期待できるが、環境負荷に課題
- RO+ED完全循環型プロセスにナノろ過膜を適用できれば、省エネルギー化と排水による環境負荷の軽減とが両立できると期待できる