

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НУКЛИДОВ (NURES) ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЖРО

*E. Tusa, Fortum Engineering Ltd, Finland*

## РЕФЕРАТ

Очистка ЖРО высокоселективным ионно-обменом может эффективно выделить только некоторые радиоактивные элементы из неактивной среды. Даже в сильно солесодержащих растворах только определенные радиоактивные элементы выводятся и концентрируются в очень небольшом объеме. Неактивные элементы остаются в жидкости. После такой обработки очищенная жидкость может быть сброшена или переквалифицирована на подлежащую более простой переработке более дешевым методом.

Относительно низкие селективные коэффициенты наиболее применяемых материалов, например, цеолитов и органических смол, ограничивают эффективность их применения. Три новых высокоселективных ионно-обменников появились на рынке. CsTreat<sup>®</sup> был разработан для удаления цезия, SrTreat<sup>®</sup> - для удаления стронция, и CoTreat - для удаления кобальта и других продуктов коррозии. Селективные коэффициенты этих новых материалов находятся на более высоком уровне, чем у обычно используемых. Их эффективность была подтверждена несколькими случаями промышленного использования этих новых материалов. Нормально могут быть достигнуты коэффициенты дезактивации в несколько тысяч. Ввиду высокой селективности, большая часть ионно-обменной емкости рабочей среды (от 0,35 meq/г<sup>1</sup> до 5 meq/г) может использоваться для удаления радиоактивных элементов из очень большого объема жидкости в очень малый объем рабочей среды.

При первом применении CsTreat на АЭС "Ловииса" в Финляндии было переработано более 900 м<sup>3</sup> высокосолёных концентратов испарителя с использованием 112 литров CsTreat. После этого на основе данных ионно-обменов были созданы несколько новых процессов, включая мобильные модули для переработки, как для низко-соляных, так и для высоко-соляных жидкостей. Одна установка была создана для очистки перерабатываемой жидкости для удаления цезия и стронция из высоко-кислотных отходов.

Высокоселективные ионно-обмены могут использоваться различными способами. Наиболее эффективный метод - применение колонн объемом 2-12 литров. Используемые обменные колонны очень легко кондиционировать в бетонных контейнерах. На АЭС "Ловииса" 12 колонн с объемом 8 литров каждая были заключены в один бетонный контейнер внутренним диаметром один кубометр.

Необходимость в небольших объемах ионно-обменных материалов делает возможным утилизировать колонны, которые заключены в контейнер, пригодный для окончательного захоронения. Малый объем ионно-обменника в сочетании с

---

<sup>1</sup> meq/г - величина, определяющая емкость ионно-обменника - милли эквивалент на грамм массы ю  
Например, если емкость по цезию составляет 0,35 meq/г, это значит, что ионно-обменник может принять 0,35 миллимоль цезия на 1 грамм ионно-обменника.

компактностью системы дают значительную экономию в стоимости переработки и захоронения.

## **ВВЕДЕНИЕ**

ЖРО очень часто содержат высокие концентрации неактивных солей, для которых использование обычно применяемых ионно-обменников, таких как цеолиты или органические смолы, невозможно. Многие жидкости перерабатываются выпариванием, или слабосоленые жидкости очищаются обычно используемыми ионно-обменниками, и такие ионно-обменники затем отверждаются для окончательного захоронения.

Высокоселективные ионно-обменные материалы дают новые возможности для очистки ЖРО. Даже жидкости, которые имеют очень высокие концентрации соли, могут быть очищены данной технологией. Это может привести к хорошим экономическим решениям, если будет сброшено больше жидкости и будут снижены объемы для захоронения. Кроме того, больше жидкостей могут быть переработаны более экономичным способом, если сбросы после очистки могут быть переклассифицированы на более простую очистку.

В течение последних десятилетий в различных странах были исследованы и разработаны большое количество селективных ионно-обменов. Однако большинство из них осталось на уровне лабораторных или опытных применений без реального промышленного использования. Только некоторые из них коммерчески доступны для использования в колоннах.

Неорганические цеолиты использовались долгое время для удаления цезия и стронция из низко-соленых жидкостей, но они неэффективны для жидкостей с высоким содержанием соли. В США для удаления цезия и стронция были разработаны кристаллин селикотитанаты (CST), и в последние годы они были доступны на полупромышленном уровне [1]. Эти селикотитанаты использовались для пробных операций, но они все еще не готовы для более масштабного использования.

В 90-х на коммерческом рынке появились три новых высокоселективных ионно-обменника [2-5]. Эти материалы полностью неорганические и доступны в гранулах различного размера как для применения в колоннах, так и для использования с предварительным покрытием (precoat applications). Селективные коэффициенты этих новых ионно-обменников находятся на существенно более высоком уровне по сравнению с другими материалами, которые коммерчески доступны. В отличие от обычно применяемых смол и некоторых новых неорганических и органических композитных смол или мембран, эти ионно-обменники могут использоваться в более широком диапазоне применения, чем для требований использования полностью неорганических ионно-обменников. Еще более важно то, что эти коммерческие продукты имеют уже несколько полномасштабных применений, на которые можно сослаться для подтверждения их эффективности.

## НОВЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЕ ИОННО-ОБМЕННИКИ

CsTreat<sup>®</sup> исходно был разработан для очистки высокосолёных (240 г/л, в основном, NaNO<sub>3</sub>) концентратов испарителя на АЭС "Ловииса" в Финляндии. Впоследствии CsTreat<sup>®</sup> нашел несколько применений для очистки других видов ЖРО. CsTreat<sup>®</sup> является на 100 % неорганическим, и его эффективность основывается на селективном соединении гексоцианоферрата. CsTreat<sup>®</sup> в основном применяется в виде гранулированной формы для работы в колоннах. Размер применяемых колонн различается от менее одного литра до 250 литров. Обычный размер гранул - 0,25-0,85 мм, но также имеются другие размеры, например, 0,15-0,25 мм и 0,85-2 мм. Последним достижением является использование порошков для предварительного покрытия размером менее 0,15 мм.

CsTreat<sup>®</sup> имеет исключительно высокий коэффициент селективности по цезию, превышающий коэффициенты коммерческих сред для выделения цезия (см. табл.1), в результате чего, он дает высокий фактор дезактивации (ФД) даже при высоких концентрациях солей, обычно в тысячи раз, а в некоторых случаях еще больше. CsTreat<sup>®</sup> работает при pH в диапазоне от 1 до 13 для высокосолёных жидкостей и при pH от 2 до 11 в низкосолёных жидкостях. Это делает его применение очень привлекательным в случаях, когда стабильное значение pH трудно выдерживать.

**Таблица 1. Коэффициенты селективности для Cs/Na обмена на промышленных ионно-обменниках [6]**

Материал ионно-обменника	Концентрация Na (mol/л)	Коэффициент селективности, $k_{Cs/Na}$
Сульфатно-кислотная смола (Sulphonic acid resin)	не известно	<10
Ресорцинол-формальдегидная Смола (Resorcinol-formaldehyde resin)	6.0	11,400 <sup>a)</sup>
Цеолит (морденит) (Zeolite (mordenite))	0.1	450
Селикотитанат (CST) (Silicotitanate (CST))	5.7	18,000
CsTreat <sup>®</sup>	5.0	1,500,000

а) коэффициент селективности рассчитан на основании измеренного коэффициента распределения в 5450 мл/г.

SrTreat<sup>®</sup> и CoTreat являются 100%-ными неорганическими ионно-обменниками, основанными на оксидах титана. Обычно SrTreat<sup>®</sup> и CoTreat используются в виде гранул в колоннах. Применялись колонны размером от менее одного до 12 литров. Обычно размер гранул 0,30-0,85 мм для обоих материалов. Как и в случае CsTreat, при необходимости могут применяться гранулы другого размера.

SrTreat<sup>®</sup> работает в диапазоне pH от нейтрального до щелочных условий. Как правило, эффективность возрастает при увеличении pH. Для высокосолёных концентраций рекомендуется диапазон pH выше 9. Когда концентрация соли ниже, достаточно хорошая эффективность может быть достигнута при более низком диапазоне pH.

Ионы кальция сильно соперничают с обменом ионами стронция, и, как и в случаях использования других ионно-обменников, высокая концентрация кальция приводит к снижению эффективности SrTreat<sup>®</sup> по удалению <sup>90</sup>Sr. Коэффициент селективности  $K_{Sr/Na}$  составляет примерно 200 000 (для цеолитов  $K_{Sr/Na}$  - до 100). Другие катионы имеют очень ограниченный (или совсем не имеют) эффект по выведению стронция с помощью SrTreat<sup>®</sup>. Обычно значение ФД лежит в диапазоне от нескольких сот до нескольких тысяч.

CoTreat был разработан для удаления радиоактивного кобальта, но он может также удалять другие коррозионные или активационные продукты; такие радионуклиды как <sup>110m</sup>Ag, <sup>109</sup>Cd, <sup>54</sup>Mn, <sup>55,59</sup>Fe и <sup>65</sup>Zn. При низких концентрациях кобальта, например, <1000 Бк/л, рабочий диапазон pH очень узок: от 7 до 8. При более высоких концентрациях, т.е. более 10 кБк/л, возможен рабочий диапазон pH от 5 до 10. Обычно ФД для ионного кобальта составляет от 100 до 1000.

CsTreat<sup>®</sup>, SrTreat<sup>®</sup> и CoTreat изготавливаются в Финляндии компанией Fortum Nuclear Services Ltd., и они нашли в мире несколько применений для различного вида отходов [2-5].

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ СЕЛЕКТИВНЫХ ИОННО-ОБМЕННИКОВ

Первое применение CsTreat<sup>®</sup> началось в 1991 году на АЭС "Ловииса" (ВВЭР) в Финляндии для очистки высокосолёных (240 г/л NaNO<sub>3</sub>) **концентратов испарителя** [7]. В этих концентратах цезий был единственным радионуклидом, препятствующим сбросу жидкости. Средняя эффективность очищающей среды была около 14 700 л/кг для первых 700 м<sup>3</sup> и более 8 000 л/кг для 900 м<sup>3</sup>. Фактор дезактивации (ФД) по <sup>137</sup>Cs был более 1000. Очищенную жидкость можно было сбросить в море, что дало значительную экономию затрат по очистке отходов.

На АЭС "Олкилуото" (BWR) в Финляндии были очищены низкосолёные **дренажи с полов**. 240 м<sup>3</sup> водяных отходов были переработаны с помощью 12-литровой колонны. Эффективность очистки была более 33 000 л/кг (149,600 gal/cu.ft.), и не было замечено признаков потери эффективности рабочей среды. Полученный ФД по <sup>137</sup>Cs зависел от расхода [2]. Очистка началась при низком расходе примерно 20 BV/час<sup>2</sup>, и был получен ФД более 1000. Потом постепенно расход был увеличен до 50 BV/час, что привело к постепенному снижению ФД и его стабилизации на уровне порядка 100.

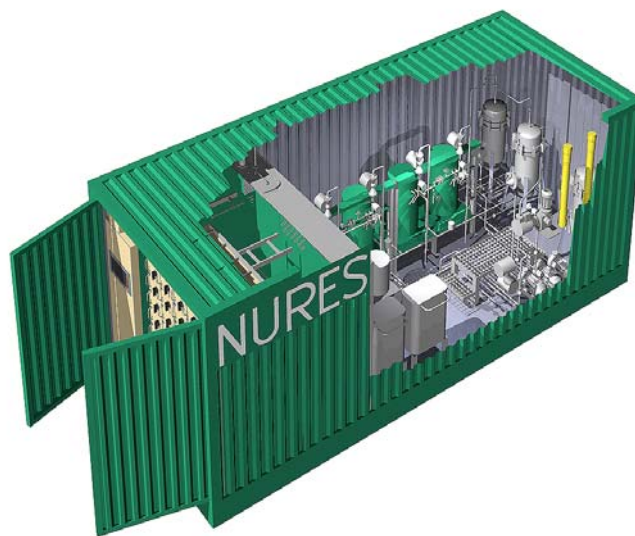
В июле 1996 г. CsTreat<sup>®</sup> был установлен на АЭС Каллавэй (Callaway NPP (PWR) в Миссури, США в системе **деминерализации** для замены испарителя [2]. Объем реагента CsTreat<sup>®</sup> был 250 л, и в течение трех лет этим объемом было очищено около 3000 м<sup>3</sup> низкосолёной воды. После того, как были установлены эффективные фильтры

---

<sup>2</sup> BV - означает объем рабочей среды (bed volume), например, при расходе 20 BV/час и объеме колонны 12 л, расход составит 240 л/ч.

для удаления из эфлюента частиц, переносящих цезий, активность  $^{137}\text{Cs}$  в эфлюенте деминерализатора нельзя было зафиксировать. Эффективность очистки рабочей средой составила около 20 000 л/кг.

В 1996 г. в Палдиски, Эстония применялся мобильный контейнер NURES (см. рис. 1), использующий CsTreat<sup>®</sup>, для очистки в общей сложности 760 м<sup>3</sup> различных водных ЖРО, которые образовались в советские времена при эксплуатации флотских реакторов, используемых для обучения. Для этой работы была использована одна 12-литровая колонна CsTreat<sup>®</sup>. Когда работа по очистке была закончена, не было отмечено потери работоспособности среды, что означает, что эффективность CsTreat<sup>®</sup> превысила 100 000 л/кг.



**Рис. 1. Мобильная система для удаления нуклидов NURES**

В 1996-97 гг. транспортабельный контейнер NURES, использующий среды CsTreat<sup>®</sup> и SrTreat<sup>®</sup>, предварительные фильтры и карбоновый фильтр, применялся в Мурманске, в России для переработки 300 м<sup>3</sup> различных РАО, наработанных атомными ледоколами [8]. Было использовано 24 литра обеих обменных сред. Максимальные ФД по  $^{137}\text{Cs}$  и по  $^{90}\text{Sr}$  были 1000 и 5000, соответственно. Оказалось, что система NURES также эффективно удаляет и другие нуклиды, например,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{125}\text{Sb}$ . Эффективность переработки была около 20 800 л/кг для CsTreat<sup>®</sup> и порядка 15 600 л/кг для SrTreat<sup>®</sup>.

В табл. 2 представлены наиболее важные параметры по приведенным выше применениям.

Летом 1992 г. иной вид применения CsTreat<sup>®</sup> и SrTreat<sup>®</sup> имел место в Japan Atomic Energy Research Institute's (JAERI) на площадке Токай в Японии для удаления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из щелочных эфлюентов после очистки. Исходные концентрации 74 МБк/л как по  $^{137}\text{Cs}$ , так и по  $^{90}\text{Sr}$ , были снижены с ФД более 1000 [9]. Проект был успешно завершён в 2000 г. Целью системы было переклассифицировать исходную жидкость для последующей более простой очистки.

Новая система очистки жидкостей, включающая использование CsTreat<sup>®</sup>, была спроектирована, лицензирована и в настоящий момент находится на стадии внедрения на АЭС "Пакш" в Венгрии (ВВЭР-440) [10]. Эксплуатация начнется в 2004 году и будет

очень похожа на АЭС "Ловииса". В баках хранения на АЭС "Пакш" накоплено для переработки около 2000 м<sup>3</sup> концентратов испарителя и других жидкостей. По предварительным оценкам значительная часть этих отходов может быть сброшена после очистки.

Первое использование CsTreat<sup>®</sup> и SrTreat<sup>®</sup> на площадке Savannah River Министерства энергетики США началось в 2000 г. Для демонстрации эффективности этих материалов будет дезактивировано около 20 000 м<sup>3</sup> загрязненной воды старого бассейна разборки.

**Таблица 2. Результаты по нескольким случаям использования CsTreat<sup>®</sup> и SrTreat<sup>®</sup>**

Площадка	Тип отходов	Переработано, м <sup>3</sup>	Использовано ионно-обменника, л	Эффективность переработки, л/кг	ФД	Среда
АЭС "Ловииса", Финляндия	концентрат испарителя	700	80 (48 кг)	14 700	>1,000	CsTreat <sup>®</sup>
АЭС "Олкилуото", Финляндия	дренажи с полов	240	12 (7,2 кг)	>33 000	100 - 1000	CsTreat <sup>®</sup>
АЭС "Каллавэй", США	дренажи с полов	>3 000	250 (150 кг)	>20 000	до 1000	CsTreat <sup>®</sup>
Палдиски, Эстония	воды от учебного реактора	760	12 (7,2 кг)	>100 000	3000	CsTreat <sup>®</sup>
Мурманск, Россия	различные ЭРО от атомных ледоколов	300	24 (14,4 кг Cs 19,2 кг Sr)	20 800 Cs 15 600 Sr	1000 Cs 5000 Sr	CsTreat <sup>®</sup> SrTreat <sup>®</sup>

## **СНИЖЕНИЕ ОБЪЕМА С ПОМОЩЬЮ СЕЛЕКТИВНЫХ ИОННО-ОБМЕНОВ**

На АЭС "Ловииса" в Финляндии было переработано более 900 м<sup>3</sup> высокосолёных (240 г/л) концентратов испарителя с помощью 14 штук 8-литровых колонн. Исходные отходы объемом 900 м<sup>3</sup> были уменьшены до 112 литров селективного ионно-обменника. Первоначально на АЭС планировалось ответвить концентрат испарителя в цемент. Цементация привела бы к образованию 1800 м<sup>3</sup> бетона из исходных 900 м<sup>3</sup> отходов.

Использованные обменные колонны будут упакованы в бетонные контейнеры. Один контейнер для окончательного захоронения может вместить до 12 использованных

обменных колонн. Внутренний объем этого контейнера 1 м<sup>3</sup>. По сравнению с объемом, который бы получился при цементировании, использование CsTreat<sup>®</sup> привело к снижению объема в более чем 1500 раз.

На АЭС "Олкилуото" было очищено 240 м<sup>3</sup> воды из баков хранения с помощью одной 12-литровой колонны с CsTreat<sup>®</sup>, при этом признаков потери работоспособности не было. Непосредственное объема снижения не кондиционированных отходов составило порядка 20 000.

В качестве примера - переработка низко-соленых вод по проекту в Палдиски, Эстония, привела к снижению объема от 760 м<sup>3</sup> до 12 литров, при этом не было замечено признаков потери работоспособности рабочей среды. Коэффициент снижения неупакованных отходов составил более 63 000.

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВЫГОДЫ ОТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОГО УДАЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ**

Селективное удаление радионуклидов может привести значительной экономии затрат не очистку различных жидкостей. После очистки селективным ионно-обменом жидкости обычно можно просто сбросить, или они могут быть перекалвалифицированы для очистки более дешевым способом.

При эксплуатации АЭС экономия обычно получается за счет того, что меньшие объемы жидкости направляются на отверждение и меньше контейнеров для окончательного захоронения поступает в могильник. Для некоторых систем, таких как деминерализатор, экономия может быть получена из-за снижения объема ионно-обменника. Например, при использовании цеолита вместо CsTreat<sup>®</sup> для удаления цезия даже в случае относительно низкой концентрации соли, количество цеолита может быть в тысячи раз больше, чем количество CsTreat<sup>®</sup>. Сама по себе система деминерализации может иметь большие преимущества по сравнению с испарителем и цементированием. На АЭС Каллавэй в США использование CsTreat<sup>®</sup> в системе деминерализатора привело к снижению затрат на очистку ЖРО на 50%, и эта экономия была получена как за счет ионно-обмена, так и за счет модификации системы [11].

Переклассификация жидкостей может дать большую экономию в случае, когда за счет использования селективного удаления радионуклидов можно отказаться от остекловывания или даже сооружения новых систем. В проекте JAERI относительно высокие концентрации Cs-137 и Sr-90 не позволяли направить ЖРО объемом 11 м<sup>3</sup> непосредственно на обычную установку по переработке на площадке Tokai-muga. Когда этот объем жидкости был переработан с помощью 20 колонн, каждая по 0,8 литров CsTreat<sup>®</sup> и 0,8 литров SrTreat<sup>®</sup>, очищенную жидкость стало возможным переработать на обычной установке для очистки ЖРО.

На объектах, где нет систем очистки, использование мобильной установки NURES может дать большую экономию, по сравнению с затратами на сооружение новой стационарной установки. Применение мобильной системы NURES в Палдиски, Эстония и в Мурманске, Россия является хорошим примером такой альтернативы.

## **ВЫВОДЫ**

Использование высокоселективных ионно-обменов дает возможность очищать различные жидкие эфлюенты эффективнее, чем в прошлом. В настоящее время часть ЖРО очищается только с относительно невысокой эффективностью, и потом жидкости сбрасываются, даже если они приводят к заметным радиоактивным выбросам в окружающую среду. Остаток ЖРО отвергается для окончательного захоронения, что приводит к значительным объемам ТРО.

Использование высокоселективных ионно-обменов дает возможность изменить указанную практику. Даже высокосоленые жидкости могут быть сброшены после удаления основных радионуклидов. По сравнению с обычными методами, во многих случаях количество сбрасываемой воды может быть увеличено, в то время как количество сбрасываемой радиоактивности снижается, и также снижается объем окончательных отходов, которые нужно захоронить. Таким образом, многие ЖРО, которые в настоящее время непосредственно отвергаются, могут быть очищены до сбросных вод, при условии, что химический состав этих жидкостей не препятствует их сбросу.

Система NURES, в которой используются новые высокоселективные ионно-обменные материалы, была установлена в различных странах. Ее эффективная работа продемонстрировала технические и экономические преимущества. Была получена экономия за счет сбросов и переквалификации ЖРО. Когда высокоселективные ионно-обменники используются в относительно небольших колоннах, нужны только маленькие системы. Может даже использоваться мобильная система, для которой требуется площадь в несколько квадратных метров. Эти особенности позволяют эксплуатировать такие системы также на объектах, где нет места для больших установок.

Дополнительным преимуществом новых высокоселективных ионно-обменников является то, что они на 100% неорганические, и они могут применяться в растущем числе случаев, где не допускаются органические материалы.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] R.Braun, T.J.Dangieri, D.J.Fennelly, J.D.Sherman, W.C.Schwerin, R.R.Willis, L.A.Bray, G.N.Brawn, N.E.Brown, J.E.Miller, D.D.Lee, R.G.Anthony, C.V.Philip, T.T.Borek and W.J.Connors, "Crystalline Silicotitanates - Novel Commercial Cesium Ion Exchangers", Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management Spectrum '96, Vol 1, 1996, p.204.
- [2] R.Harjula, J.Lehto, L.Brodkin and E.Tusa: CsTreat - Highly Efficient Ion Exchanger for the Treatment of Cs-Bearing Waste Waters, Proceedings of EPRI International Low Level Waste Conference, Providence, RI, USA, July 21-23, 1997.
- [3] R.Harjula, J.Lehto, L.Brodkin, E.Tusa and J.Rautakallio: Treatment of Nuclear Waste Effluents by Highly Selective Inorganic Ion Exchange Medias - Experiences gained and new developments, Proceedings of Waste Management '98, Tucson, AZ, USA, March 1-3, 1998.

- [4] R.Harjula, J.Lehto, A.Paajanen, L.Brodkin and E.Tusa: Testing of Highly Selective CoTreat Ion Exchange Media for the Removal of Radiocobalt and Other Activated Corrosion Product Nuclides from NPP Waste Waters, Proceedings of Waste Management '99, Tucson, AZ, USA, February 28-March 4, 1999.
- [5] J.Lehto, L.Brodkin, R.Harjula and E.Tusa: Separation of Radioactive Strontium from Alkaline Nuclear Waste Solutions with Highly Effective ion Exchanger SrTreat, Nucl.Tech., 127(1999)81.
- [6] R.Harjula, J.Lehto, A.Paajanen, L.Brodkin and E.Tusa: Removal of Radioactive Cesium from Nuclear Waste Solutions with the Transition Metal Hexacyanoferrate Ion Exchanger CsTreat<sup>®</sup>, submitted for publication
- [7] E.H.Tusa, A.Paavola, R.Harjula and J.Lehto: Industrial Scale Removal of Cesium with Hexacyanoferrate Exchanger - Process Realization and Test Run, Nuclear Technology vol.107, Sept. 1994, pp.279-284.
- [8] J.Lehto, L.Brodkin and R.Harjula: SrTreat - A Highly Effective Ion Exchanger for the Removal of Radioactive Strontium from Nuclear Waste Solutions, Proceedings of 6<sup>th</sup> International Low Level Waste Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, Singapore, October 12-16, 1997, p.245.
- [9] H. Tajiri, T. Mimori, K. Miyajima, T. Uchikosi, H. Mizubayashi and E.Tusa: Experience of Test Operation for Removal of Fission Product Nuclides in TRU-Liquid Waste and Concentrated Nitric Acid Using Inorganic Ion-Exchangers, Proceedings of Waste Management 2000, Tucson, AZ, USA, February 27-March 2, 2000.
- [10] B. Szabo, E. Tusa, E. Mattila, New System Installed for Nuclide Removal and Boron Recovery at the Paks NPP in Hungary, Proceedings of Waste Management '04, Tucson, AZ, USA, February 29 - March 4, 2004.
- [11] B.Miller and P.Tucker: Evaps to Demins - The Sponge is Working at Callaway, Proceedings of EPRI International Low Level Waste Conference, July 21-23, 1997, Providence, RI, USA.