

## Ukládání vyhořelého jaderného paliva

**Jana Petřů, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [petruj@vscht.cz](mailto:petruj@vscht.cz), Jan Macák, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, [macakj@vscht.cz](mailto:macakj@vscht.cz)**

### Souhrn

*Pro bezpečné uložení vyhořelého jaderného paliva je zásadní jak vhodný výběr lokality tak životnost úložného obalového souboru. Kandidátní materiály pro jednotlivé vrstvy kontejnerů podléhají korozním procesům, ovlivněným složením prostředí v konkrétních typech úložišť. Důležitými faktory jsou především zvýšená teplota, chemické složení bentonitových a granitických vod, přítomnost kyslíku, mikrobiální aktivita a další. Pro hlubinné úložiště ČR jsou zvažovány materiály uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, měď a její slitiny, titanové slitiny.*

**Klíčová slova:** *nepovinná (11 bodů, kurzíva), mohou být i v angličtině*

### Materiály pro úložné obalové soubory

Materiály úložného obalového souboru vyhořelého jaderného paliva a jejich korozní odolnost budou jedním z nejdůležitějších faktorů v otázce dlouhodobé životnosti a bezpečnosti celého hlubinného úložiště. Volba materiálů pro sestavy superkontejnerů bude ovlivněna jak jejich mechanickými vlastnostmi, tak i chemickou odolností v daném prostředí. Korozní chování úložného kontejneru bude záviset na okolních podmínkách, jimž bude vystaven, především to budou: saturace vody v úložišti, teplotní gradient, redoxní podmínky, chemie pórové vody, mikrobiální aktivita, transportní podmínky prostředí, vnitřní pnutí, vnější zatížení a mechanismus transportu plynu [1].

Jednotlivé koncepty ÚOS jsou pro předpověď dlouhodobého chování posuzovány na základě mechanických vlastností a na základě chemické odolnosti. Na rozdíl od uvažovaných případů mechanického selhání není možné eliminovat všechny potenciální typy poruch koroze pomocí vhodného výběru materiálu a provedení kontejneru. Je zjevně nepraktické použít zlatý (nebo pozlacený) kontejner, aby se zabránilo korozi, a dokonce i navrhované použití vysoce odolných slitin, jako Cr-Ni-Mo-W slitina C22 nebo slitiny Ti obsahující Pd, je sporné kvůli dostupnosti nákladů a zdrojů. Proto je přijatelné, že nádoba bude vystavena jednomu nebo více typům koroze, která nakonec určuje životnost celého zařízení [2]. Jako nejvhodnější materiály pro konstrukci úložných kontejnerů byly vybrány litiny, uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, titanové a niklové slitiny a měď.

Geologické podloží v České republice se podobá lokalitám pro hlubinná úložiště severovýchodních zemí, např. Švédska a Finska, lze se tedy inspirovat v jejich postupu a volbě materiálů. Stejně jako v severovýchodním konceptu je plánovaný úložný kontejner pro ČR dvouplášťový. Ve švédském konceptu byla již v počátcích výzkumu navržena měď jako vhodný kandidátní materiál kvůli její termodynamické stabilitě a odolnosti proti korozi v anoxických podmínkách podzemních vod [3]. Švédský koncept tedy obsahuje vnější obal z mědi a vnitřní litinovou vložku. Byly také studovány vlivy výroby těchto obalů. Pro měděný obal byly použity metody válcování (kdy se ze dvou měděných desek válcují poloviny trubek, které jsou svařeny dohromady, podélný svar však může být nevýhodou) a různé metody pro výrobu bezešvých trubek. Bylo také testováno chování lité oceli a tvárné litiny, která projevuje menší riziko defektů. Z vlivů prostředí úložiště je důležitým chemickým procesem vnější koroze mědi. Za dosud známých podmínek hlubinného úložiště se očekává, že nádoba zůstane neporušená po velmi dlouhou dobu, delší než 100 000 let. Pokud do nádoby vnikne voda, vložka z litiny koroduje anaerobně (protože podzemní voda je anoxická) s tvorbou vodíku a magnetitu. Korozní rychlost se očekává asi  $0,1 \mu\text{m rok}^{-1}$ . Oba materiály kanystru mohou být ohroženy korozním praskáním, což je dále studováno v laboratoři v Äspö [4].

Český koncept obalového souboru je dvouplášťový kontejner ve dvou variantách: korozně přijatelný a korozně odolný koncept (Tab. 1). Korozně přijatelný koncept zahrnuje vnější obal z uhlíkové oceli s tloušťkou zaručující mechanickou a korozní stabilitu, vnitřní vestavba kontejneru, která bude zajišťovat bezpečnost zařízení po zkorodování vnějšího obalu, bude vyrobena z korozivzdorné oceli. V korozně odolném konceptu bude vnější obal z mědi nebo titanové slitiny a vnitřní obal z uhlíkové oceli. Kontejner bude spolu s bentonitovým bufferem tvořit takzvaný superkontejner [5]. Na vnější obal kontejnerů může být ještě nanášena další ochranná vrstva materiálu. Tloušťka jednotlivých vrstev bude souviset se zvoleným materiálem, typem konceptu, typem uloženého paliva a bude v řádu desítek milimetrů až stovek mm (pro dna a víka kontejnerů).

**Tab. 1 České koncepty úložného kontejneru**

Koncept obalového souboru	Vnitřní vrstva	Vnější vrstva
Korozně přijatelný	korozivzdorná ocel	uhlíková ocel
Korozně odolný	uhlíková ocel	měď
		titanová slitina

Základní parametry hlubinného úložiště, ke kterým je vztažena životnost konstrukčních materiálů, jsou mechanické zatížení kontejneru 20MPa a teplota 100°C a vliv aerobního a anaerobního prostředí hlubinných úložišť [6]. Konečná podoba modelu pro podmínky českého úložiště se stále vyvíjí, jako příklad jednoho z prvních typů kontejnerů můžeme uvést typ ÚOS Škoda 440/7, který patří ke konceptu korozně přijatelnému a skládá se z vnitřního pouzdra z korozivzdorné oceli dle normy ČSN 17381 a vnějšího obalu z uhlíkové oceli dle normy ČSN 12022 s antikorozním povlakem. Konkrétně na českých vědeckých pracovištích byly testovány tyto materiály: uhlíková ocel 12020 a 422707.9, korozivzdorná ocel EN 1.4462 (2205) a EN 1.1104 (2205), měď Cu-OF a titanová slitina Grade 7 (Ti Gr. 7, Ti-02.Pd) [7].

### Korozní charakteristika kandidátních materiálů

Koroze/oxidace kovů je elektrochemická reakce, produkující elektrony a s ní spřažená redukce. V hlubinných úložištích mohou být redukovány buď některé korozní produkty ( $\text{Fe}^{\text{III}}$ ), kyslík nebo voda. Tyto sloučeniny mají různé tendence k redukci a budou tedy spotřebovány v pořadí podle jejich relativních redukčních potenciálů. Ochotněji reagují (mají vyšší redukční potenciál)  $\text{O}_2$  a  $\text{Fe}^{\text{III}}$  a vyvolávají oxidaci kovu. Redukce vody a produkce plyných produktů proběhne tedy až v dalších fázích procesu [8].

Přestože oxidace kovového železa se souběžnou redukcí  $\text{O}_2$  nebo  $\text{Fe}^{\text{III}}$  nevede k produkci plynů, povrchové reakce během počátečních fází uložení mohou ovlivnit mikrostrukturu a chemické složení povrchu nádoby a mohou tedy být relevantní pro chování systému v pozdějších fázích. Tyto korozní procesy, spotřebovávající kyslík, mají také vliv na délku aerobní fáze úložiště. Během počátečního období od uložení kontejnerů dochází za zvýšených teplot v aerobním prostředí, kdy dochází k rychlé difúzi kyslíku pórovitým bentonitem, ke vzniku magnetitu a hematitu. Vzniká duplexní korozní vrstva tvořená vnější vrstvou hematitu s rovnoosými zrny a vnitřní vrstvou magnetitu, který může být dále dělen na dvě podvrstvy s různými mikrostrukturami sloupcových zrn [13]. Pro vývoj a růst oxidických vrstev existuje řada modelů: parabolický, logaritmický a další avšak experimentální studie o dlouhodobém chování železa (a nízkolegovaných ocelí) neexistují. Jako jediný způsob, jak získat odhad rychlosti oxidace za relevantních podmínek pro delší časová období, je použít publikované údaje z krátkodobých studií a extrapolovat je.

Výsledky studií korozního chování konkrétních materiálů ve specifických podmínkách hlubinných úložišť se nachází v určitém rozmezí hodnot a je nutné zvolit reprezentativní hodnotu koroze, která bude použita pro další výpočty v bezpečnostní analýze. Řada faktorů a podmínek nejsou snadno vyčíslitelné a pochopení převažujících procesů a příslušných fyzikálních a (elektrochemických) mechanismů v

závislosti na fázi vývoje úložiště je složité. Postup hodnocení chování materiálů nutně zahrnuje určitý stupeň subjektivismu a konzervatismu.

Například jako konzervativní hodnota koroze uhlíkové oceli, která je používána při predikcích životnosti úložného zařízení, se udává 2  $\mu\text{m}/\text{rok}$ . V literatuře uváděné minimální a maximální hodnoty rychlosti koroze oceli v bentonitech jsou 0,1  $\mu\text{m}/\text{rok}$  (pro oceli v roztocích) a 5  $\mu\text{m}/\text{rok}$  (hodnota získaná z archeologických analogů v příslušných prostředích) [9].

### **Litina**

Litina je slitina Fe-C s obsahem uhlíku nad 2,14 % a s dalšími příměsemi (Si, Mn, P). Má vysokou odolnost vůči tlaku a teplotě, ale proti ocelím nízkou pružnost. Tato slitina je navržena jako jeden z vhodných materiálů pro vnitřní část švédského měděného kontejneru. Vnitřní litinová vrstva kontejneru by měla splňovat normu /EN 1563:1997/ EN-GJS-400-15U týkající se mechanických vlastností. Složení je určeno švédskou normou SS14071, dále bylo specifikováno toto složení: < 0.05% Cu, < 6% C, < 4% Si a > 90% Fe [10].

Pokud vnější měděný obal kontejner zůstane nepoškozen, lze vlivy tepelné expanze, galvanickou korozi i korozní praskání považovat za nepravděpodobné. V případě porušení kanystru a vniknutí vody k litinové vložce, může docházet ke galvanické korozi. Pokud by podzemní voda obsahovala kyslík, byla by rychlost koroze litiny velmi vysoká - až 100  $\mu\text{m}$  za rok. V době vniknutí vody do nádoby se však předpokládá, že voda bude bez kyslíku. V bezkyslíkové vodě byly naměřené korozní rychlosti litiny, galvanicky spojené s mědí, ve stejném rozmezí jako u litiny v nepřítomnosti galvanického spojení s mědí [11]. Korozní praskání kovů (SCC) vyžaduje kombinaci statických tahových napětí, specifického chemického prostředí a citlivosti materiálu, nepříznivé kombinace těchto podmínek mohou vést k zahájení a šíření trhlin.

Experimentální práce [10,12] studující vliv korozních produktů a složení vody na korozní rychlost uvádějí nízkou korozní rychlost – menší než 1  $\mu\text{m}/\text{rok}$ , ovšem zahrnují i podmínky nevyskytující se v úložišti. Ve vodě s vysokou iontovou silou při pH 7 až 8 byla u litin měřena korozní rychlost 0,1  $\mu\text{m}/\text{rok}$ , při pH 10,5 0,01  $\mu\text{m}/\text{rok}$ . I při rychlosti korozi 1  $\mu\text{m}/\text{rok}$  bude litinová vložka kontejneru přítomna desítky tisíc let po selhání měděné nádoby.

### **Uhlíková ocel**

Uhlíková ocel je slitina Fe-C s nízkým obsahem nečistot, jako jsou Mn, S a Si. Uhlíkové oceli lze rozdělit do tří hlavních kategorií dle obsahu uhlíku. Nejrozšířenější jsou nízkouhlíkaté oceli s obsahem C méně než 0,25% [13]. Výhodou uhlíkových ocelí je jejich nízká cena, rovnoměrná korozní rychlost a tyto materiály velmi dobře odolávají anaerobním prostředím předpokládaným v hlubinných úložištích. Vlivem anaerobního prostředí se na povrchu materiálu tvoří magnetit dle Schikorrovy reakce. V závislosti na konkrétním prostředí mohou zároveň vznikat i další korozní produkty a rozdílné pasivní vrstvy. Podle literatury existuje pouze malé riziko lokálního napadení uhlíkových ocelí v anoxických prostředích [14].

Obecná koroze uhlíkové oceli v experimentálním oxidačním prostředí podzemních vod je velmi vysoká: v rozmezí 10 až 100  $\mu\text{m}/\text{rok}$  (Tab. 2), proto se tento materiál považuje za vhodný k použití v redukčních prostředích. Uhlíková ocel může za specifických podmínek podléhat SCC (Stress Corrosion Cracking) – jedná se o alkalické roztoky a roztoky uhličitánů za přítomnosti cyklického zatěžování. Je však nepravděpodobné, že by tyto podmínky mohly v hlubinném úložišti nastat. Další možnou příčinou SCC je tvorba vodíku během korozního procesu [15].

Míra atmosférické koroze závisí na řadě faktorů, včetně úrovně znečištění chloridy, teplotě, době ovlhčení povrchu kovu, úrovni znečištění  $\text{SO}_2$ , relativní vlhkosti a pH deště. V neznečištěných venkovských atmosférách je rychlost koroze typicky v rozmezí 10-50  $\mu\text{m}/\text{rok}$ , ale v přímořských atmosférách může dojít k rychlosti koroze až do 1200  $\mu\text{m}/\text{rok}$  [16]. Koroze v roztocích bude záviset na konkrétních podmínkách prostředí, jako jsou pH, teplota (která může například zvyšovat rychlost chemických reakcí nebo ovlivňovat rozpustnost kyslíku), účinky záření, obsah plynů ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ), obsah dalších složek prostředí (například  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}[\text{OH}]_2$ ) a další.

**Tab. 2 Korozní rychlosti dle typu prostředí z literatury**

Materiál	Prostředí	Korozní rychlost $\mu\text{m}/\text{rok}$	Literatura
Uhlíková ocel	Oxidační	10-100	17,18
	Redukční	0,18-18	19
		0,1-10	20

### **Korozivzdorná ocel**

Korozivzdorné oceli se často vyskytují nebo vyskytovaly ve výběru potenciálních materiálů pro kontejnery pro uložení vyhořelého paliva. Je to například případ Belgie [21], kde byl navrhován kontejner z nejběžnějšího typu korozivzdorné oceli AISI 304 (odpovídá našemu standardu 17240) s překrytím ocelí AISI 316L (17349), která je legována molybdenem ke zvýšení odolnosti proti důlkové korozi a vyznačuje se nízkým obsahem uhlíku, díky čemuž je méně náchylná ke zcitlivění a následnému mezikrystalickému koroznímu napadení. O korozivzdorných ocelích jako součásti inženýrských bariér HU uvažují například také Francie, Korea (vnější část kontejneru).

Nízkouhlíkatým formám ocelí 304 a 316 se dává pro aplikace v HU přednost zejména z důvodu předejití možnosti zcitlivění, ke kterému by mohlo dojít například během sváření kontejnerů. Je dále vyžadován hladký povrch exponovaných částí kontejnerů – bez spojů, štěrbin a trhlin. Konstatuje se vysoká houževnatost těchto ocelí a tedy vyšší šance kontejnerů odolat úderu (například při pádu z výšek předepsaných v Code of Federal Regulations). V uvedené studii [22] se dále uvádí vcelku nevýznamný vliv radiace na korozní rychlost korozivzdorné oceli 304L. Nicméně se konstatuje, že při extrémně dlouhých expozicích lze patrně očekávat radiační křehnutí svarů. Korozní kinetika korozivzdorných ocelí se (z dlouhodobého hlediska) řídí lineárním zákonem a naměřená korozní rychlost je velice nízká (přibližně  $4 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\text{rok}$  [23]).

### **Měď**

Měď je dobře vodivý, tvárný materiál, který má antimikrobiální vlastnosti. Použití mědi jako svrchní část kontejneru bylo vybráno v severských zemích a Kanadě. Měď je vysoce odolná proti korozi a patří do skupiny korozně přijatelných materiálů. Předpokládaná vrchní vrstva z mědi by měla být od 25 – 50 mm tlustá, aby nedošlo ke ztrátě mechanických vlastností materiálu. Síla této vrstvy je přímo závislá na mechanických vlastnostech, protože z pohledu korozní odolnosti se předpokládá, že i tenká vrstva mědi zabráni korozi [24]. Měď v přítomnosti vlhkosti vytváří ochrannou oxidickou vrstvu a to již od tloušťky 9nm.

**Tab. 3 Korozní rychlosti dle typu prostředí z literatury**

Materiál	Prostředí	Korozní rychlost $\mu\text{m}/\text{rok}$	Literatura
Měď	Oxidační	0,5-3,5	25
		0,04-7	26
	Redukční	$5 \times 10^{-5}$ -0,02	25
		0,55	27
		$4 \times 10^{-3}$ -0,02	26

### **Titanové slitiny**

Výhodou těchto materiálů je potenciálně dlouhá životnost a vysoký stupeň odolnosti proti štěrbinové korozi v prostředích hlubinných úložišť (některé slitiny jsou však náchylné ke štěrbinové korozi v horkých chloridových roztocích). Tyto materiály podléhají pouze plošné korozi a vodíkem iniciovanému praskání (HIC - hydrogen-induced cracking). Obalové vrstvy kontejnerů z těchto materiálů mohou být

tenkostěnné, což je výhodné pro konstrukci a kontrolu, ale vyžadují vnitřní podporu. Významnou výhodou slitin Ti je jejich odolnost vůči mikrobiální korozi (MIC).

Korozní chování slitin titanu je určeno převážně vlastnostmi pasivního filmu oxidu titaničitého ( $\text{TiO}_2$ ) a jak jsou tyto vlastnosti ovlivněny potenciálem, pH, teplotou a expozicí různým vodním prostředím. Ze všech běžných pasivních slitin vykazuje Ti nejširší rozsah pasivity, pokud jde o stabilitu  $\text{TiO}_2$  jako funkci redoxního potenciálu a pH.

### **Niklové slitiny**

Za kandidátní kontejnerové materiály byly niklové slitiny považovány v Kanadě (Slitina C-276 [UNS N10276] a 625 [UNS N06625]), v Německu (Slitina C-4 [UNS N06455]), v Belgii (slitina C-4, 625 a C-22) a pro YMP ve Spojených státech (slitiny 625, 825 [UNS N08825] a 22 [UNS N06022]). Všechny tyto slitiny patří buď do skupiny slitin Ni-Cr-Mo nebo Ni-Fe-Cr-Mo. Stejně jako u korozivzdorných ocelí byly niklové slitiny vybrány jako potenciální kontejnerové materiály na základě odolnosti proti korozi založené na pasivním filmu Cr (III) [28]. Rychlosti plošné koroze jsou u niklových slitin nízké jak za aerobních tak anaerobních podmínek.

Dalším materiálem vhodným pro konstrukci úložných kontejnerů by mohl být olovo, které má dobré radiační ochranné vlastnosti a odolnost proti korozi v přírodních vodách, především díky vznikajícím pasivním filmem uhličitanu olovnatého. Rychlost koroze je v průměru 0,001 mm za rok při 75°C [29]. Vhodnou protikorozi ochranou úložných kontejnerů mohou být také různé povlaky nanášené na základní kovový materiál, například povlaky na bázi kovů, kovokeramických materiálů a neoxidické keramiky [6].

## **Závěr**

Primární funkcí hlubinného úložiště je izolace radioaktivního odpadu a po uzavření ukládacích prostor musí být kontejner nepropustný a odolný proti chemickému prostředí a musí odolat mechanickému zatížení z bobtnání bentonitu, hydrostatickému tlaku a tlaku horniny. Chemická odolnost znamená, že vnější část nádoby nesmí být ovlivňována korozivními látkami v podzemních vodách, ani jinými škodlivými látkami, které byly zaneseny do prostředí během výstavby a provozu úložiště. Nádoba nesmí navíc vnitřně korodovat jako důsledek aktivity látek, které se mohou vyskytovat jako vnesené nečistoty nebo mohou být vytvořeny v nádobě [4].

Materiály ÚOS mohou být poškozovány korozními procesy a to především plošnou, důlkovou, štěrbinovou korozi, korozním praskáním, galvanickou korozi nebo mikrobiální korozi. Konkrétní typy napadení jsou specifické pro danou kombinaci materiálů, podmínek a charakteru prostředí. Z dostupné literatury byly vybrány a popsány hlavní kandidátní materiály pro úložné kanystry včetně parametrů jejich použití. Jako nejčastěji uvažované materiály pro prostředí hlubinných úložišť byly vyhodnoceny litiny a uhlíkové oceli, korozivzdorné oceli, měď, slitiny titanu a niklu.

Financováno z účelové podpory na specifický vysokoškolský výzkum MŠMT č. 20-SVV/2018 a SÚJB/KÚ/9021/2015.

## **Literatura**

[1] Hill, Shannon L.W., "The Corrosion of Carbon Steel under Deep Geologic Nuclear Waste Disposal Conditions" (2016). Electronic Thesis and Dissertation Repository. 3820.

[2] Department of Energy, Yucca Mountain Repository License Application, DOE/RW- 0573 (Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2008).

[3] The Swedish Corrosion Research Institute, Copper as an encapsulation material for unprocessed nuclear waste—evaluation from the viewpoint of corrosion, KBS TR 90.

[4] Hedman, Tommy, Anders Nyström, and Claes Thegerström. "Swedish containers for disposal of spent nuclear fuel and radioactive waste." *Comptes Rendus Physique* 3.7-8 (2002): 903-913.

[5] Hlubinné úložiště radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. SÚRAO [online]. Praha 1: CRS, 2016 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/data/original/files/pr/brozury/brozura-hlubinne-uloziste-2016.pdf>

[6] MĚKUTA, Marek. *Degradace absorpčního materiálu vestavby ukládacího obalového souboru pro hlubinné ukládání vyhořelého jaderného paliva*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

[7] Výzkum a vývoj úložného obalového souboru. SÚRAO [online]. Praha 1 [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/hlubinne-uloziste/domaci-projekty/clanek-373-vyzkum-a-vyvoj-ulozneho-obaloveho-souboru>

[8] Diomidis, N., 2014. Scientific basis for the production of gas due to corrosion in a deep geological repository. Technical Report 14-21, Switzerland.

[9] Neff, D., Saheb, M., Monnier, J., Perrin, S., Decostes, M., L'Hostis, V., Crusset, D., Millard, A. and Dillman, P. 2010. A review of the archaeological analogue approaches to predict the long-term corrosion behaviour of carbon steel overpack and reinforced concrete structures in the French disposal systems. *Journal of Nuclear Materials*, vol. 402, pp. 196-205.

[10] Werme, Lars, and Christina Lilja. *Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site*. No. SKB-TR--10-46. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2010.

[11] Smart N R, Rance A P, Fennell P A H, 2005. Galvanic corrosion of copper-cast iron couples.. SKB TR-05-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

[12] Smart, N.R., Blackwood, D.J. & Werme, L. (2002a): Anaerobic corrosion of carbon steel and cast iron in artificial groundwater. Part 1. Electrochemical aspects. *Corrosion* 58, 547-557.

[13] Hill, Shannon L.W., "The Corrosion of Carbon Steel under Deep Geologic Nuclear Waste Disposal Conditions" (2016). *Electronic Thesis and Dissertation Repository*. 3820. <http://ir.lib.uwo.ca/etd/3820>

[14] Černoušek, T., et al. "STUDIUM KOROZNÍCH PROCESŮ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ V ČR." *Jaderná energetika v pracích mladé generace-2012*.

[15] Hundal Jung, Tae Ahn and Xihua He REPRESENTATION OF COPPER AND CARBON STEEL WASTE PACKAGE DEGRADATION IN A GENERIC PERFORMANCE ASSESSMENT MODEL, 2016. U.S.NRC. <https://www.nrc.gov/docs/ML1036/ML103610365.pdf> (accessed April 12, 2017).

[16] H.R. Ambler, A.A.J. Bain, *J. Appl. Chem.* 5 (1955): p. 437.

[17] D. FÉRON, D. CRUSSET, and J.-M. GRAS, "Corrosion Issues in Nuclear Waste Disposal," *Journal of Nuclear Materials*, 379, 16 (2008).

[18] F. FOCT, J. CABRERA, W. DRIDI, and S. SAVOYE, "Corrosion Behavior of Carbon Steel in the Tournemire Clay," *Proceedings of the 2nd International Workshop on Long-Term Prediction of Corrosion Damage in Nuclear Waste Systems*, Nice, September 2004, pp. 69, ANDRA Scientific and Technical Series, ANDRA, Chatenay-Malabry, France (2004).

[19] H. YOSHIKAWA, E. GUNJI, and M. TOKUDA, "Long Term Stability of Iron for More than 1500 Years Indicated by Archaeological Samples from the Yamato 6th Tumulus," *Journal of Nuclear Materials*, 379, 112 (2008).

[20] D. DAVID, C. LEMAITRE and C. CRUSSET, "Archaeological Analogue Studies for the Prediction of Long-Term Corrosion on Buried Metals," pp. 242, EFC Series Vol. 36, Prediction of Long-Term Corrosion Behavior in Nuclear Waste Systems, Eds. D. Feron and D. D. Macdonald, European Federation of Corrosion Publications, Maney, London (2002).

- [21] Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories, Report EUR19964EN, Nuc.Energy Agency, 2003.
- [22] F.H. Huang / *Journal of Nuclear Materials* 231 (1996) 74-82.
- [23] T. Sakuragi et al., *Progress in Nuclear Energy* 87 (2016) 26-31.
- [24] Thalia Standish, Jian Chen, Rebecca Jacklin, Pellumb Jakupi, Sridhar Ramamurthy, Dmitriy Zagidulin, Peter Keech, David Shoesmith, *Electrochimica Acta* 211 (2016) 331–342
- [25] B. ROSBORG and L. WERMER, “The Swedish Nuclear Waste Program and the Long-Term Corrosion Behavior of Copper,” *Journal of Nuclear Materials*, 379, 142 (2008).
- [26] P. WERSIN, K. SPAHIU, and J. BRUNO, “Kinetic Modeling of Bentonite-Canister Interaction Long-Term Predictions of Copper Canister Corrosion Under Oxidic and Anoxic Conditions,” SKB TR94-25, MBT Tecnología Ambiental, Cerdanyola, Spain (1994).
- [27] N. TANIGUCHI and M. KAWASAKI, “Influence of Sulfide Concentration on the Corrosion Behavior of Pure Copper in Synthetic Seawater,” *Journal of Nuclear Materials*, 379, 154 (2008).
- [28] King, Fraser. "Container materials for the storage and disposal of nuclear waste." *Corrosion* 69.10 (2013): 986-1011.
- [29] R. GUASP, L. LANZANI, P. BRUZZONI, W. CUFRE, C.J. SEMINO Lead corrosion evaluation in high activity nuclear waste container. [Online]. [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/31/060/31060544.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/060/31060544.pdf) (accessed May 14, 2017).