

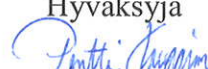




Boorihapon ja litiumhydroksidin vaikutus Inconel 690 –höyrystinputken passiivikerroksen ominaisuuksiin

Kirjoittajat: Timo Saario

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Boorihapon ja litiumhydroksidin vaikutus Inconel 690 –höyrystinputken passiivikerroksen ominaisuuksiin		
Asiakkaan nimi, yhteystiedot SAFIR 2014 -tutkimusohjelma	Asiakkaan viite	
Projektin nimi Vesikemia ja laitoksen käyttövarmuus	Projektin numero/lyhytnimi 73786 / WAPA	
Raportin laatija(t) Timo Saario	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 17/	
Avainsanat höyrystinputki, passivointi, boori, litium	Raportin numero VTT-R-00093-12	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tässä tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti litiumin ja boorin vaikutusta Inconel 690 –höyrystinputken pintaan PWR-laitoksen esipassivointia vastaavissa olosuhteissa syntyvän passiivikerroksen ominaisuuksiin. Passivoitikäsitteilyn lämpötila oli $T = 292^{\circ}\text{C}$, paine 100 bar ja kaikissa kokeissa veteen liunneen vedyn määrä oli n. $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Passivoitikäsitteilyn pituus oli maksimissaan 100 tuntia, ja passivoinnin edistymistä seurattiin in situ sähkökemiallisella impedanssispektroskopiolla. Impedanssin mitattu maksimiarvo korreloi korroosionopeuden kanssa siten, että mitä suurempi on impedanssin arvo, sitä parempi on korroosionkestävyys.</p> <p>Litiumin määrän kasvun todettiin pienentävän lineaarisesti passiivikerroksen impedanssia, eli kasvattavan korroosionopeutta. Litiumin konsentraation kasvattaminen tasolta $[\text{Li}] = 0.5 \text{ mg/l}$ tasolle $[\text{Li}] = 2.0 \text{ mg/l}$ pienentää passiivikerroksen impedanssia kertoimella n. x2.5. Boorin lisääminen kasvatti mitattua passiivikerroksen impedanssia kaikilla litium-pitoisuuksilla.</p> <p>Altistuksen aikana syntyneen passiivikerroksen ESCA/XPS –analyysi osoitti, että passiivikerros on voimakkaasti rikastunut kromista, eli kromivalentainen oksidi. Korkeampi litiumpitoisuus tuottaa paksumman, heikommin suojaavan passiivikerroksen.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 10.1.2012 Laatija  Timo Saario Principal Scientist	Tarkastaja  Petri Kinnunen Principal Scientist	Hyväksyjä  Pentti Kauppinen Technology Manager
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaja 1 kpl, VTT 1 kpl.		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Alkusanat

Tämä tutkimus on tehty osana SAFIR 2014 –tutkimusohjelman projektia ”Vesikemian vaikutus laitoksen käyttövarmuuteen”.

Espoo 10.1.2012

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
2 Tavoite.....	4
3 Menetelmät.....	5
4 Tulokset.....	5
5 Tulosten tarkastelu	14
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	16
Lähdeviitteet	16

1 Johdanto

Painevesilaitoksen primääriveden kanssa kosketuksissa olevasta metallipinnasta 60-70% muodostuu höyrystinputkien sisäpinnasta. Kun halutaan minimoida uuden laitoksen primääripiiriin rakenneosista vapautuvien korroosiotuotteiden määrää, on höyrystinputkien passivointi näin ollen tärkeässä roolissa. Mitä parempi ja kestävämpi passiivikerros höyrystinputkien pintaan saadaan muodostettua ennen kuin ensimmäinen ydinpolttoaineen lataus tehdään, sen vähemmän jäädytekiertoon vapautuu korroosiotuotteita. Pieni korroosiotuotteiden määrä taas näkyy vähäisempänä aktiivisten osalajien muodostumisena reaktorin ytimessä ja edelleen vähäisempänä aktiivisten osalajien kulkeutumisena primääripiirin muille pinnoille (so. aktiivisuuden kerääntymisenä).

Esipassivoinnissa käytettävä vesikemia vaikuttaa keskeisesti höyrystinputkien pintaan syntyvän passiivikerroksen ominaisuuksiin. Tavoitteena on muodostaa primääripiirin pinnoille hyvin passivoiva Cr-rikas spinelli-tyyppinen oksidi. Painelaitosten primääripiiriin esipassivointiin käytettiin 1970-luvulle saakka ionipuhdasta vettä /1/. Seuraavana askeleena oli siirtyä käyttämään emäksistä vettä, jossa ionipuhdaaseen veteen lisättiin litiumhydroksidia (LiOH) niin, että litiumpitoisuus oli 1-2 mg/l. Japanilaiset julkaisivat 1990-luvun alussa tutkimuksen, jossa oli verrattu ionipuhdasta vettä, ionipuhdasta vettä johon oli lisätty litiumhydroksidia, ionipuhdasta vettä johon oli lisätty 30 cc/kgH₂O liuennutta vetyä sekä ionipuhdasta vettä johon oli lisätty sekä 30 cc/kgH₂O liuennutta vetyä että 0.5 mg/l litiumia. Näistä parhaan esipassivoitituloksen Inconel 600 ja 690 höyrystinputkille tuotti jälkimmäinen vesikemiavaihtoehto /2-4/. Laitosten käyttökokemusten mukaan ko. esipassivoitavesikemialla päästiin 10-30% matalampiin aktiivisuustasoihin kuin pelkällä ionipuhdaalla vedellä. Lisäämällä sinkin syöttö (n. 5 ppb) esipassivoinnin aikaiseen vesikemiaan on päästy vielä 40-60% alempiin aktiivisuustasoihin, kuten Tomari-3 -laitoksen kokemukset ovat osoittaneet /5/. Myös länsimaissa on siirrytty käyttämään liuennutta vetyä (30 cc/kgH₂O), mutta suositeltu litiumin määrä on japanilaisia korkeampi, 1-2 mg/l. Boorihapon käytöstä litiumhydroksidin ja liuenneen vedyn lisänä on toistaiseksi kokemusta vain Sizewell B -laitoksen esipassivoinnissa. Esipassivoinnissa käytettävästä optimaalisesta vesikemiasta ei näin ollen ole kansainvälistä yksimielisyyttä.

2 Tavoite

Tutkimuksessa selvitettiin litiumin ja boorin vaikutusta Inconel 690 höyrystinputken passiivikerroksen ominaisuuksiin PWR-laitoksen esipassivoitinkäsittelyä simuloivissa vesikemiaolosuhteissa. Tavoitteena oli selvittää passiivikerroksen suojaavuuden kannalta paras litiumpitoisuus (vaihteluvälillä 0.5 – 2.2 mg/l) ja boorilisäyksen vaikutus samalla litiumin vaihteluvälillä.

3 Menetelmät

Koekappaleena käytettiin Inconel 690 –höyrystinputkesta (EPRI NDE Center) irrotettuja näytteitä, joiden pinta-ala oli n. 1 cm². Näytteisiin kiinnitettiin PTFE-pinnoitettu nikkelimilanka vastushitsauksella, ja hitsauskohta suojattiin PTFE-teipillä. Näytteet sijoitettiin haponkestävästä ruostumattomasta teräksestä (AISI 316) tehtyyn läpivirtauskennoon, johon lisäksi sijoitettiin platina-elektrodi (Pt) ja referenssielektrodi (0.1 M Ag/AgCl). Haluttu vesikemia tuotettiin vesikemiapiirillä, josta vesi paineistuksen (p = 100 bar) ja lämmityksen (T = 292°C) jälkeen ohjattiin kulkemaan vesikemiakennon läpi. Veden pH:ta ja johtokykyä seurattiin vesikemiapiirin matalapaineosan antureilla. Boorihappo- ja litiumhydroksidilisäykset tehtiin vesikemiapiirin sekoitussäiliöön. Vetylisäys (n. 30 cc/kgH₂O) tehtiin paineistamalla sekoitussäiliö 5N tyypellä tehdyn hapenpoiston jälkeen puhtaalla vedyllä n. 1.5 bar paineeseen. Kokeissa käytetyt vesikemiavaihtoehdot on esitetty taulukossa 1. Booripitoisuudet valittiin siten, että kullakin litiumpitoisuudella MULTEQ-ohjelmalla laskettu veden pH koelämpötilassa T = 292°C on sama, so. pH_{292C} = 6.78.

Taulukko 1. Tutkitut vesikemia-vaihtoehdot.

Li (mg/l)	0.5	1	2	0.5	1	2
B (mg/l)	0	0	0	245	594	1200

Inconel 690 –näytteiden passiivikerroksen suojaavuutta seurattiin sähkökemiallisella impedanssispektroskopialla. Mittaukset tehtiin kuuden tunnin välein kunnes impedanssispektri ei enää muuttunut, maksimissaan n. 100 tunnin ajan. Impedanssi on systeemin vaihtovirtavastus. Tasavirtavastusta kuvataan Ohmin lailla

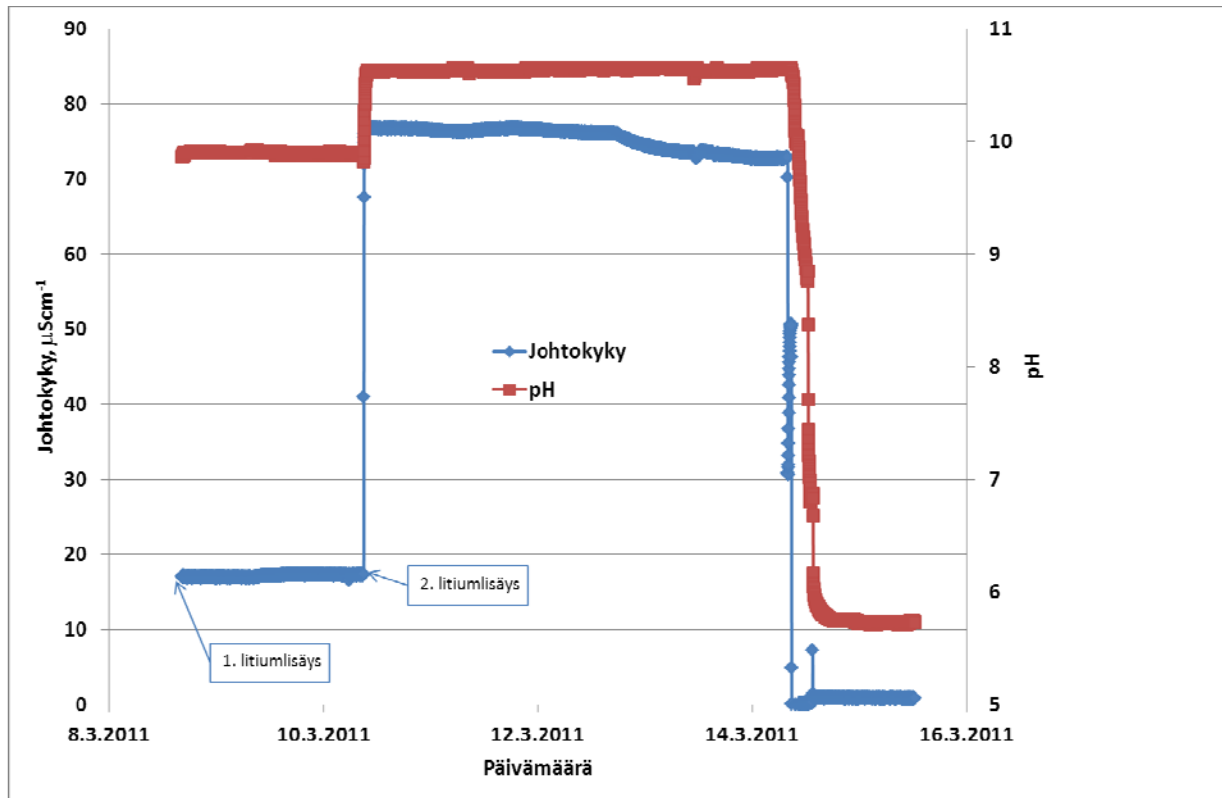
$$U = R \cdot I \quad (1)$$

missä U on potentiaali (jännite), R on vastus ja I on virta. Hieman yksinkertaistaen, PWR ympäristössä potentiaali U on redox-potentiaali (~ vakio, vastaten H⁺/H₂ –reaktion tasapainopotentiaalia), vastus R on matalilla taajuuksilla (f < 10 mHz) mitattu impedanssi ja virta I on korroosiovirta joka on suoraan verrannollinen korroosionopeuteen. Näin ollen matalia taajuuksia vastaava impedanssi on käänteisesti verrannollinen korroosionopeuteen, so. mitä suurempi matalilla taajuuksilla mitattu impedanssi on, sitä pienempi on korroosionopeus. Valittujen näytteiden passiivikerroksen koostumus määritettiin altistuksen jälkeen ESCA/XPS –menetelmällä.

4 Tulokset

Kuvassa 1 on esitetty johtokyky ja pH kokeelle, jossa litiumpitoisuuden tavoitearvo oli ensimmäisessä vaiheessa 0.5 mg/l ja seuraavassa vaiheessa 2.2 mg/l. Välillä 8.3 – 11.3 veden tavoitepitoisuus litiumille oli 0.5 mg/l ja välillä 11.3 – 15.3 2.2 mg/l. Kokeen lopussa kiertovesi ohjattiin kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky putosi lähelle nollaa ja pH lähelle

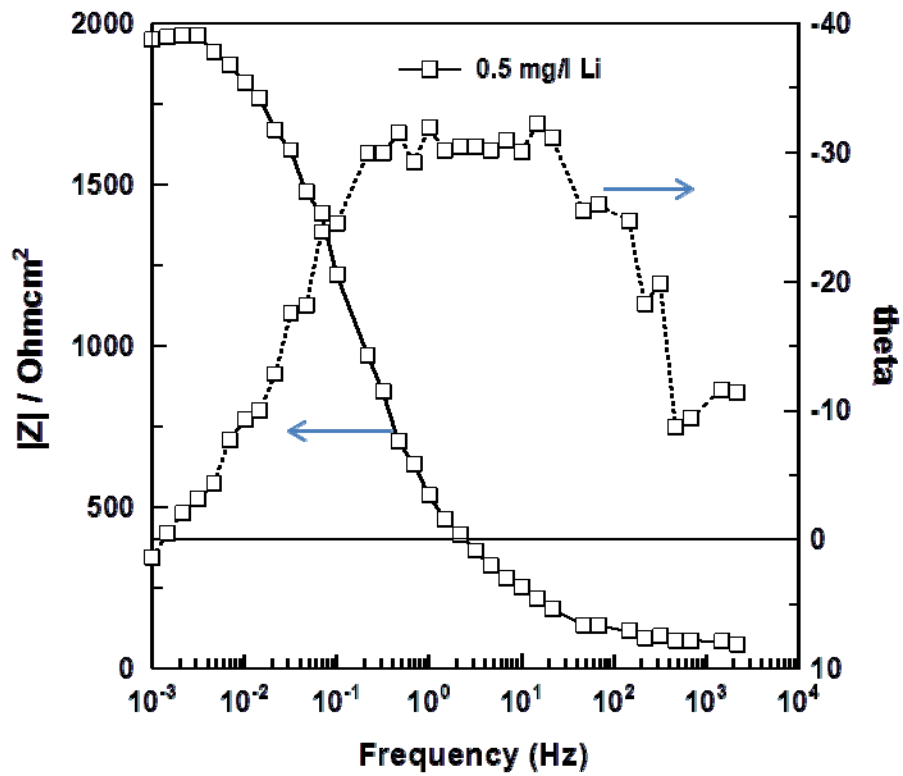
neutraalia pH arvoa. $T = 292^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Kuvan 1 johtokyky- ja pH-arvot vastaavat melko hyvin MULTEQ-ohjelmalla vastaaville litiumpitoisuuksille laskettuja arvoja. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty näitä vaiheita vastaavat impedanssispektrit. Litiumpitoisuudella 0.5 mg/l matalilla taajuuksilla impedanssin arvo on noin $Z = 1960 \text{ Ohmcm}^2$ (kuva 2) ja pitoisuudella 2.2 mg/l vastaavasti $Z = 680 \text{ Ohmcm}^2$ (kuva 3).



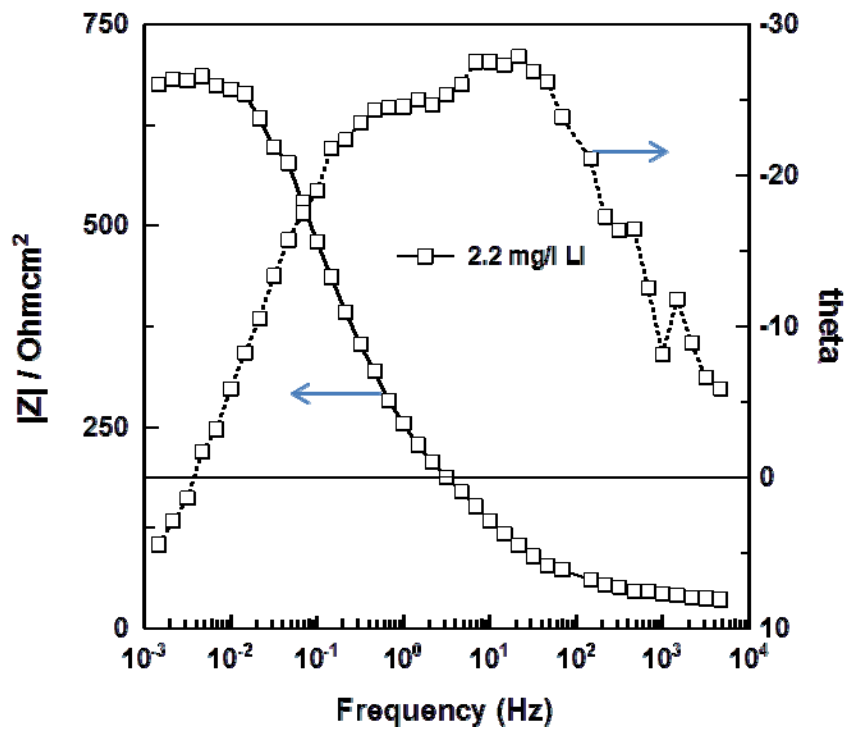
Kuva 1. Kokeen 1 pH ja johtokyky ajan funktiona.

Kuvassa 4 on esitetty johtokyky ja pH kokeelle, jossa litiumpitoisuuden tavoitearvo oli 0.5 mg/l ja boorin tavoitearvo 245 mg/l . Kokeen alussa kiertovesi ohjattiin kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky putosi lähelle nollaa ja pH lähelle neutraalia pH arvoa. Seuraavaksi veteen lisättiin 245 mg/l booria (boorihappona), ja edelleen 0.5 mg/l litiumia (litiumhydroksidina). Kokeen lopussa kiertovesi ohjattiin jälleen kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky pienentyi nopeasti. $T = 292^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Kuvan 4 johtokyky- ja pH-arvot vastaavat melko hyvin MULTEQ-ohjelmalla vastaaville litium- ja booripitoisuuksille laskettuja arvoja.

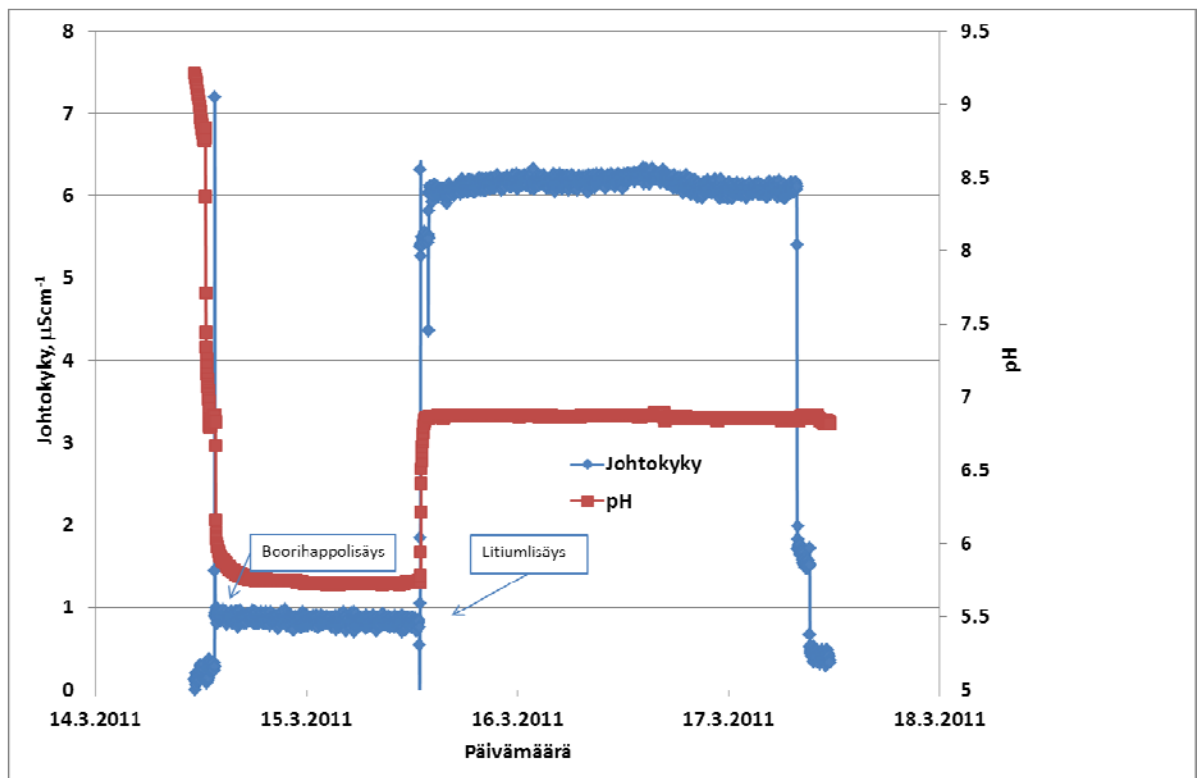
Kuvassa 5 on esitetty tässä liuoksessa koelämpötilassa passiivikerroksen tasaantunutta vaihetta edustava impedanssispektri. Matalilla taajuuksilla impedanssin arvo on noin $Z = 2600 \text{ Ohmcm}^2$.



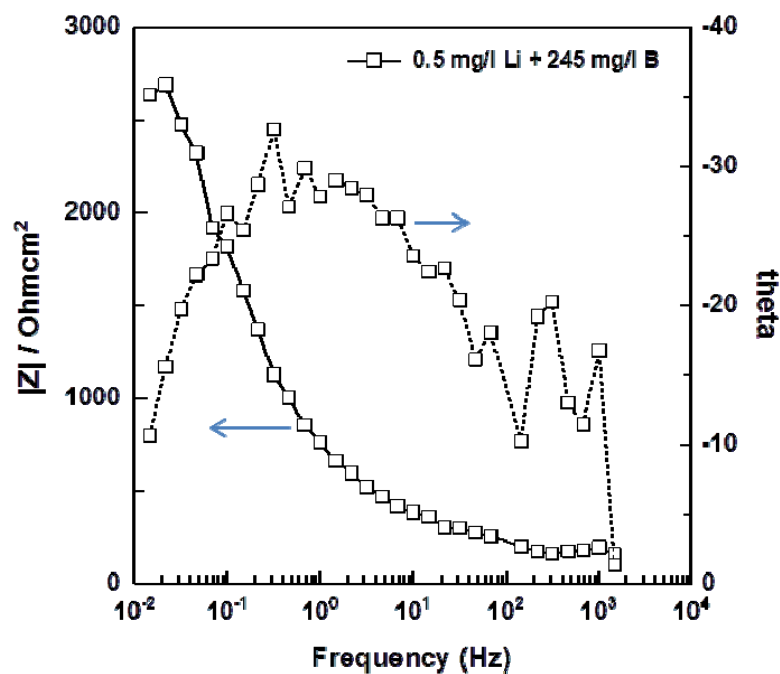
Kuva 2. Litiumlisäystä 0.5 mg/l vastaava Inconel 690 –näytteen impedanssispektri.



Kuva 3. Litiumlisäystä 2.2 mg/l vastaava Inconel 690 –näytteen impedanssispektri.



Kuva 4. Kokeen 2 pH ja johtokyky ajan funktiona. ($[Li] = 1.0 \text{ mg/l}$ ja $[B] = 584 \text{ mg/l}$)

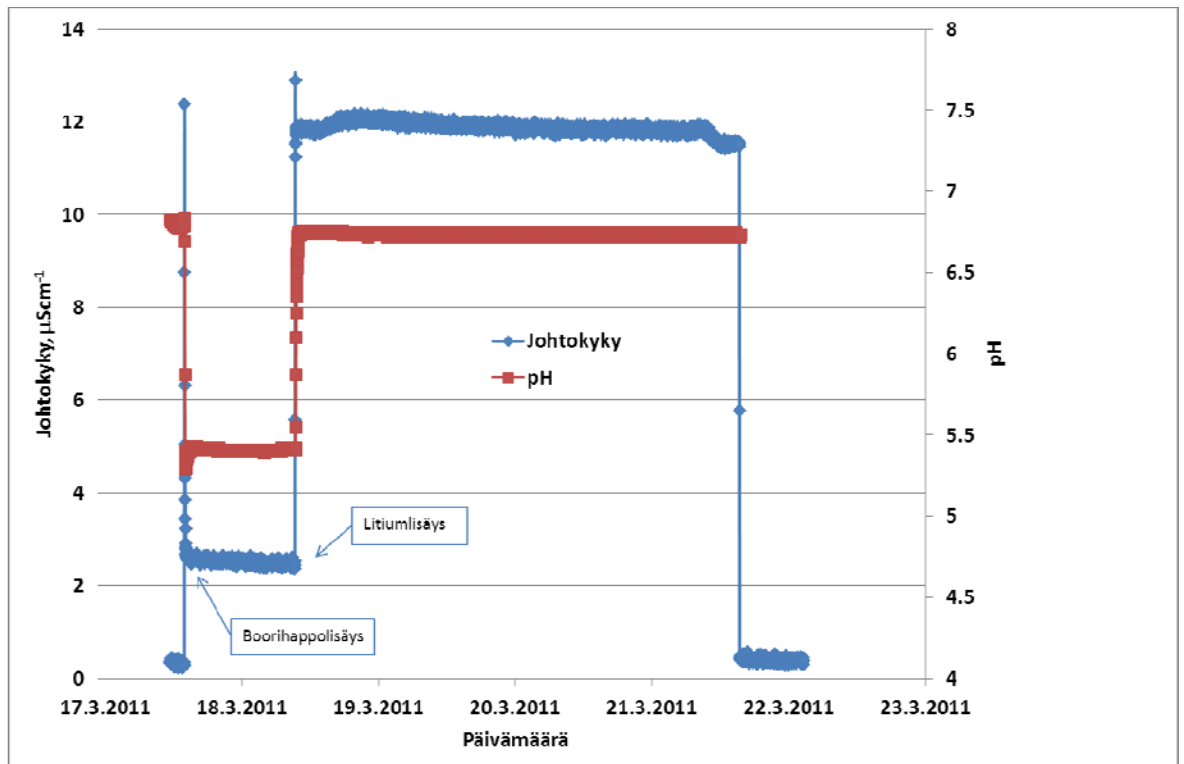


Kuva 5. Litiumlisäystä 0.5 mg/l ja boorilisäystä 245 mg/l vastaava Inconel 690 –näytteen impedanssispektri.

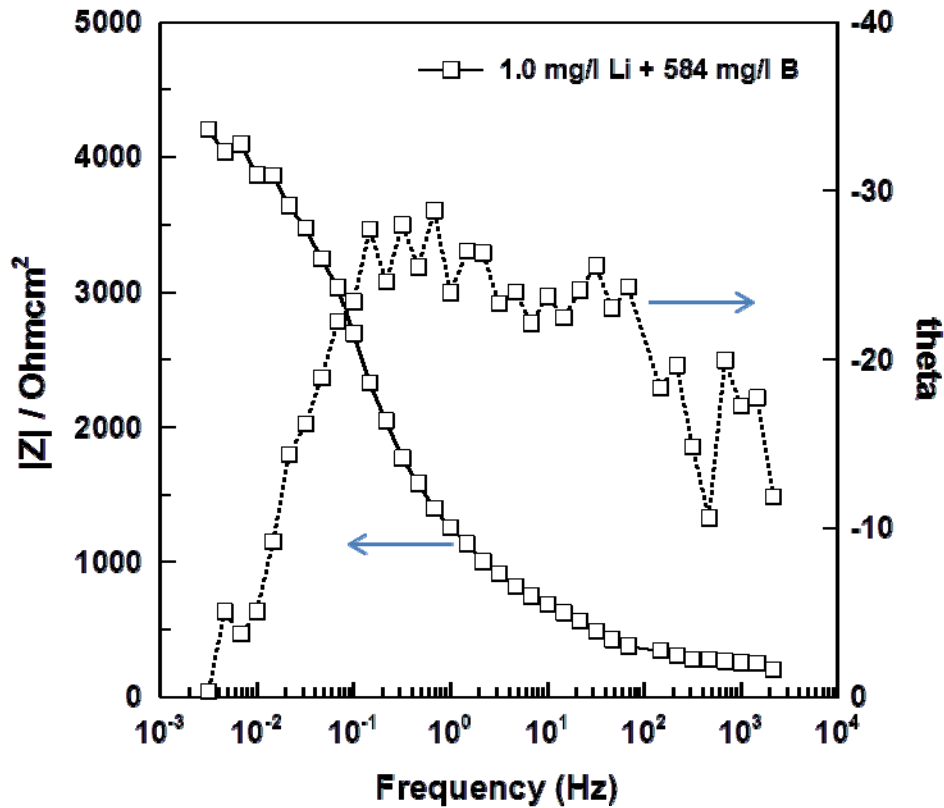
Kuvassa 6 on esitetty johtokyky ja pH kokeelle, jossa litiumpitoisuuden tavoitearvo oli 1.0 mg/l ja boorin tavoitearvo 584 mg/l . Kokeen alussa kiertovesi oli edellisen kokeen jäljiltä ohjattu kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin

veden puhdistuessa johtokyky putosi lähelle nolaa ja pH lähelle neutraalia pH arvoa. Seuraavaksi veteen lisättiin 584 mg/l booria (boorihappona), ja edelleen 1.0 mg/l litiumia (litiumhydroksidina). Kokeen lopussa kiertovesi ohjattiin jälleen kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky pienentyi nopeasti. $T = 292^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Kuvassa 7 on esitetty tässä liuoksessa koelämpötilassa passiivikerroksen tasaantunutta vaihetta edustava impedanssispektri. Matalilla taajuuksilla impedanssin arvo on noin $Z = 4200 \text{ Ohmcm}^2$.

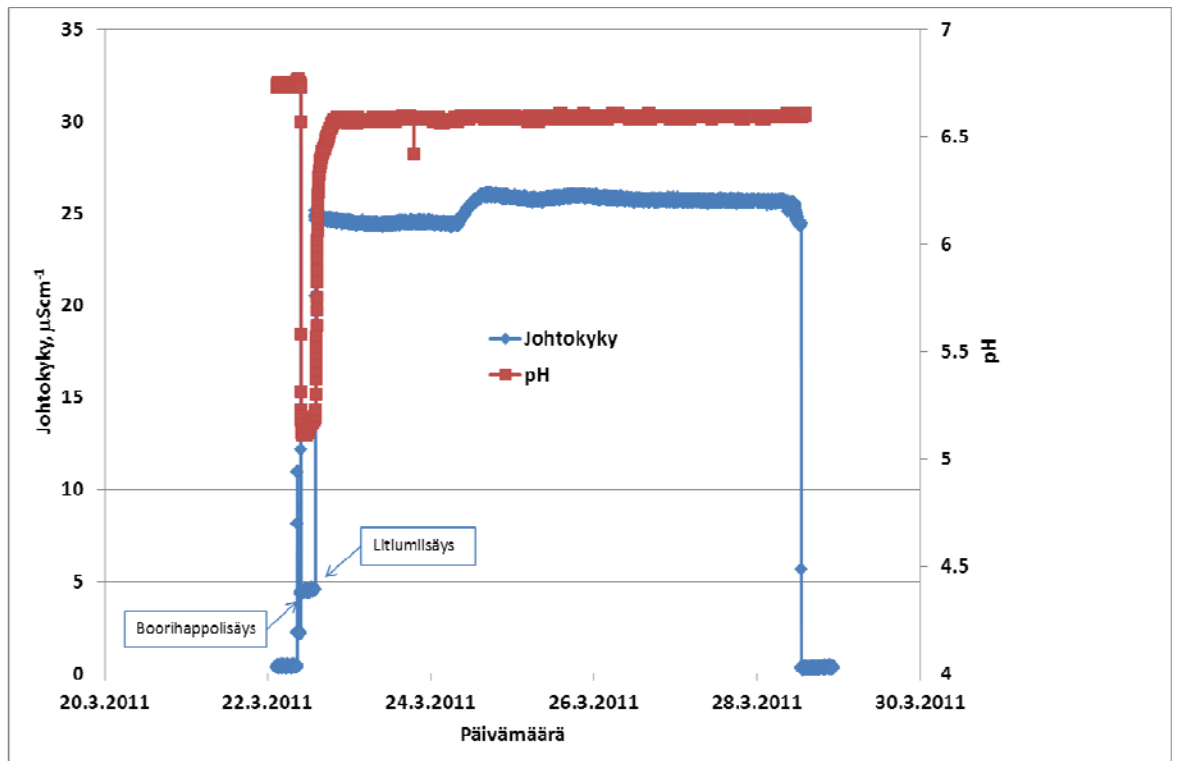
Kuvassa 8 on esitetty johtokyky ja pH kokeelle, jossa litiumpitoisuuden tavoitearvo oli 2.0 mg/l ja boorin tavoitearvo 1200 mg/l. Kokeen alussa kiertovesi oli edellisen kokeen jäljiltä ohjattu kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky putosi lähelle nolaa ja pH lähelle neutraalia pH arvoa. Seuraavaksi veteen lisättiin 1200 mg/l booria (boorihappona), ja edelleen 2.0 mg/l litiumia (litiumhydroksidina). Kokeen lopussa kiertovesi ohjattiin jälleen kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky pienentyi nopeasti. $T = 292^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Kuvassa 9 on esitetty tässä liuoksessa koelämpötilassa passiivikerroksen tasaantunutta vaihetta edustava impedanssispektri. Matalilla taajuuksilla impedanssin arvo on noin $Z = 560 \text{ Ohmcm}^2$.



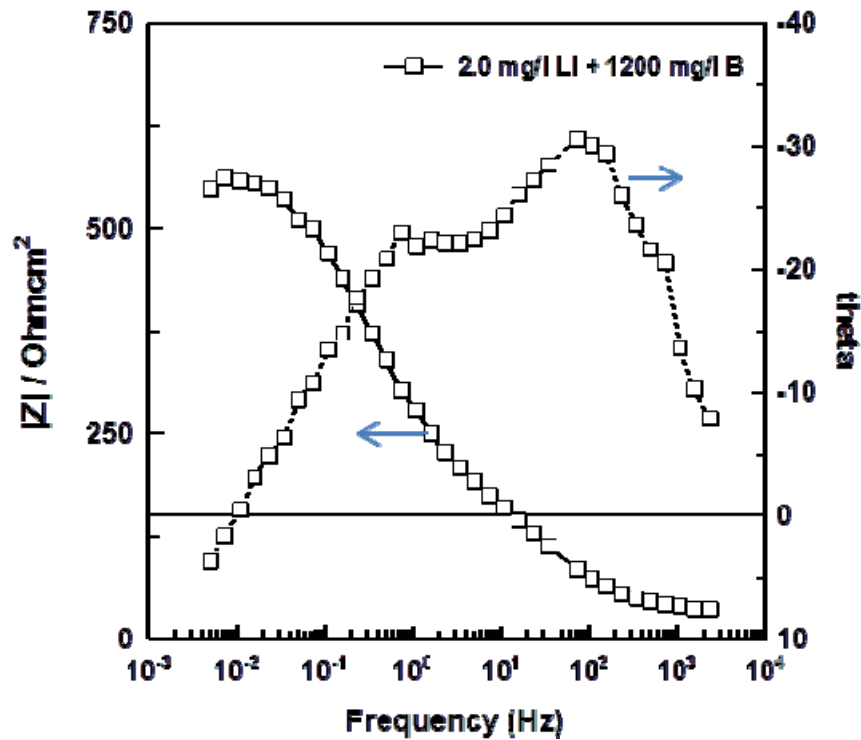
Kuva 6. Kokeen 3 pH ja johtokyky ajan funktiona ($[\text{Li}] = 1.0 \text{ mg/l}$ ja $[\text{B}] = 584 \text{ mg/l}$).



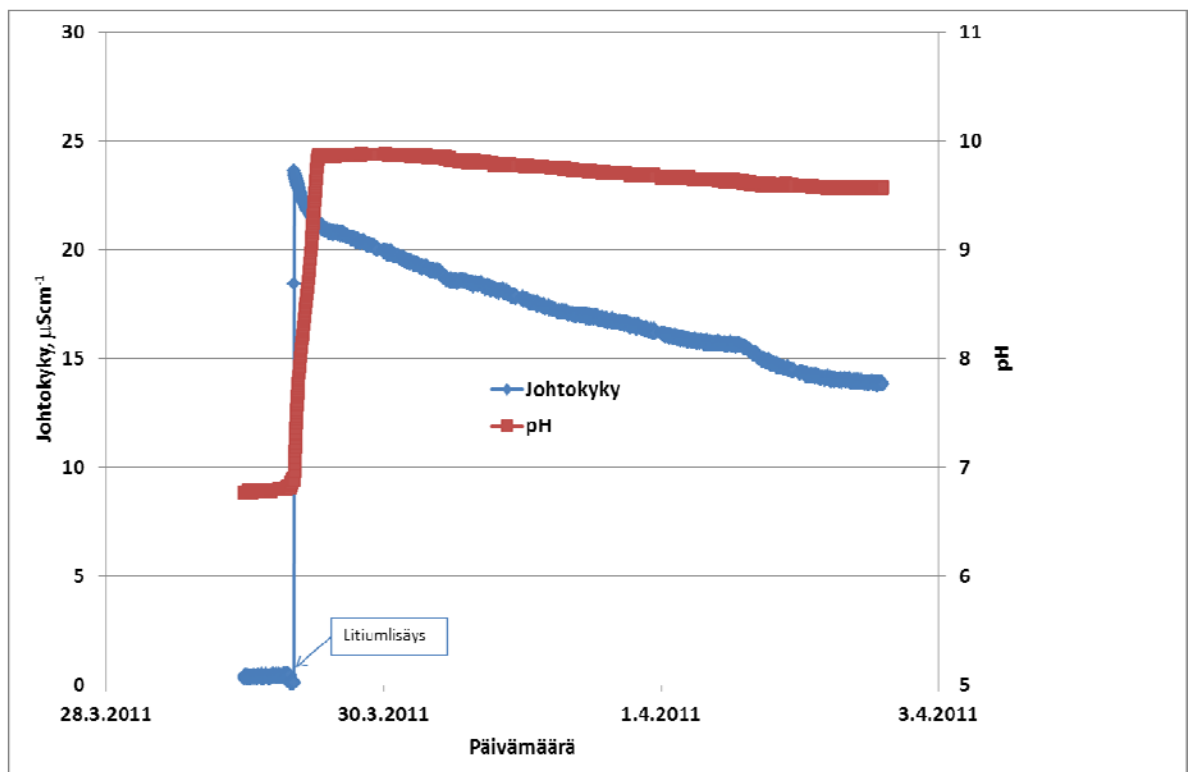
Kuva 7. Litiumlisäystä 1.0 mg/l ja boorilisäystä 584 mg/l vastaava Inconel 690 – näytteen impedanssispektri.



Kuva 8. Kokeen 4 pH ja johtokyky ajan funktiona ($[Li] = 2.0 \text{ mg/l}$ ja $[B] = 1200 \text{ mg/l}$).



Kuva 9. Litiumlisäystä 2.0 mg/l ja boorilisäystä 1200 mg/l vastaava impedanssispektri.

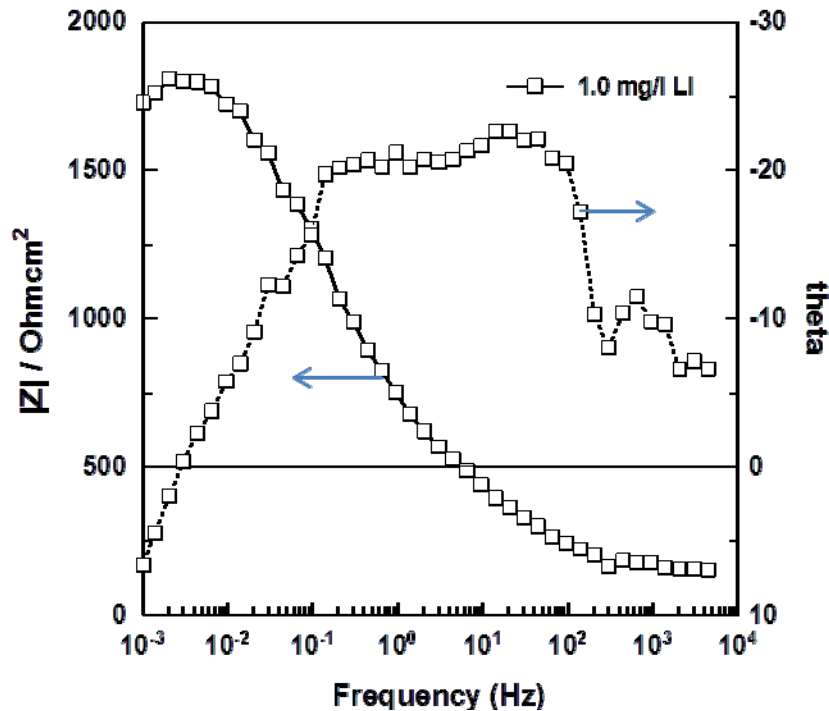


Kuva 10. Kokeen 5 pH ja johtokyky ajan funktiona (tavoitearvo [Li] = 1.0 mg/l).

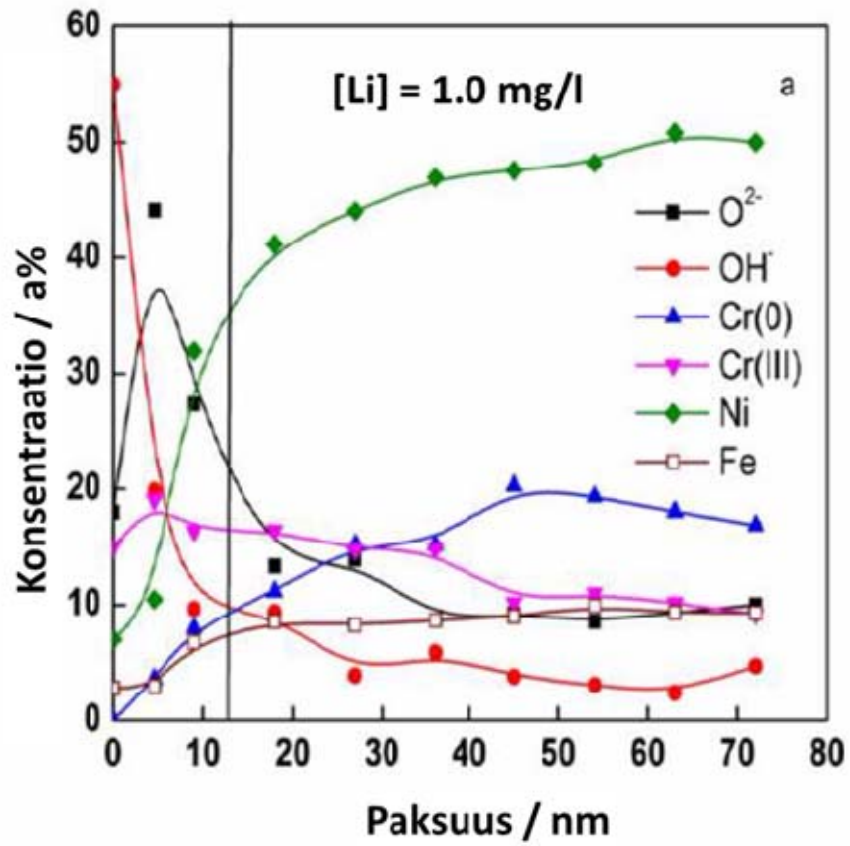
Kuvassa 10 on esitetty pH ja johtokyky kokeelle, jossa litiumpitoisuuden tavoitearvo oli 1 mg/l. Kokeen alussa kiertovesi oli edellisen kokeen jäljiltä

ohjattu kulkemaan ioninvaihtimen kautta, jolloin veden puhdistuessa johtokyky putosi lähelle nollaa ja pH lähelle neutraalia pH arvoa. Seuraavaksi veteen lisättiin 1.0 mg/l litiumia (litiumhydroksidina). Laskennallisesti johtokyvyn olisi pitänyt nousta tasolle n. $34 \mu\text{Scm}^{-1}$ ja pH:n tasolle n. 10.16. Jostain syystä sekä johtokyky että pH laskivat koko kokeen ajan. Jos oletetaan, että tämä johtuu litium-tason laskusta, edustaa kuvassa 11 esitetty koelämpötilassa passiivikerroksen tasaantunutta vaihetta vastaava impedanssispektri Li-pitoisuutta n. 0.6 mg/l. Matalilla taajuuksilla impedanssin arvo on noin $Z = 1800 \text{ Ohmcm}^2$.

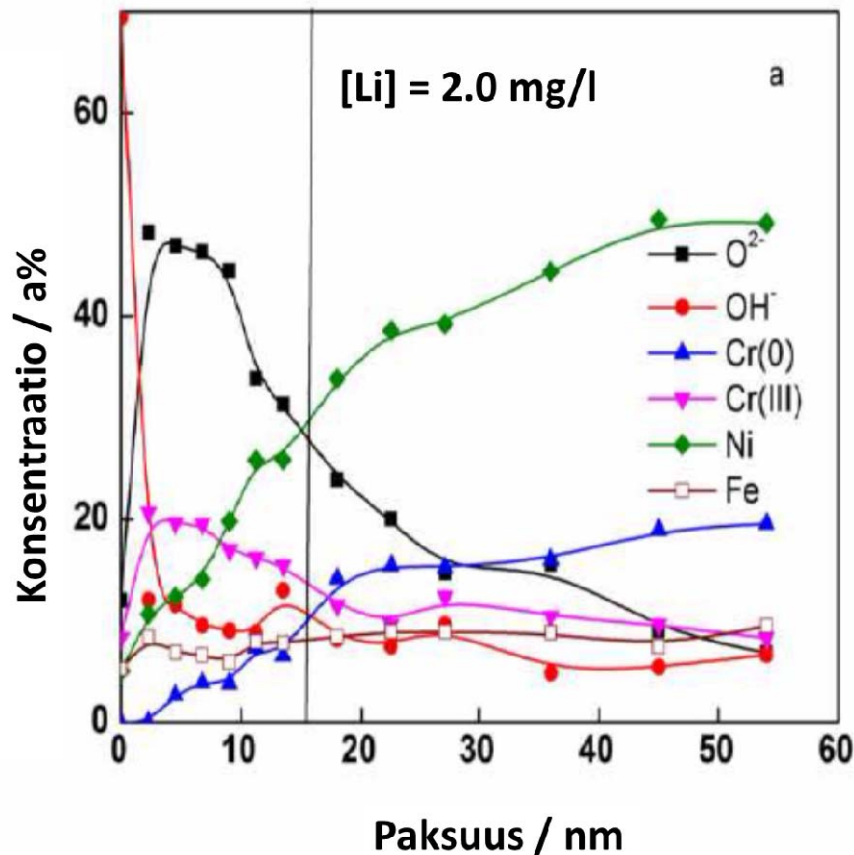
Kuvassa 12 ja 13 on esitetty ESCA/XPS –analyysin tulokset näytteille, jotka oli altistettu litium-pitoisuuksille 1.0 mg/l ja 2.0 mg/l, vastaavasti. Alkuainekoostumuksesta havaitaan, että passiivikerros on voimakkaasti köyhtynyt nikkelin ja raudan suhteen ja rikastunut kromin suhteen. Passiivikerroksen paksuus on litiumpitoisuudella $[\text{Li}] = 1.0 \text{ mg/l}$ noin $L = 13 \text{ nm}$, ja litiumpitoisuudella $[\text{Li}] = 2.0 \text{ mg/l}$ noin $L = 16 \text{ nm}$.



Kuva 11. Litiumlisäystä 1.0 mg/l vastaava impedanssispektri.



Kuva 12. Inconel 690-näytteen passiivikerroksen koostumus (ESCA/XPS analyysi); T = 292°C, [H₂] = 30 cc/kgH₂O, [Li] = 1.0 mg/l.



Kuva 13. Inconel 690-näytteen passiivikerroksen koostumus (ESCA/XPS analyysi); $T = 292^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$, $[\text{Li}] = 2.0 \text{ mg/l}$.

5 Tulosten tarkastelu

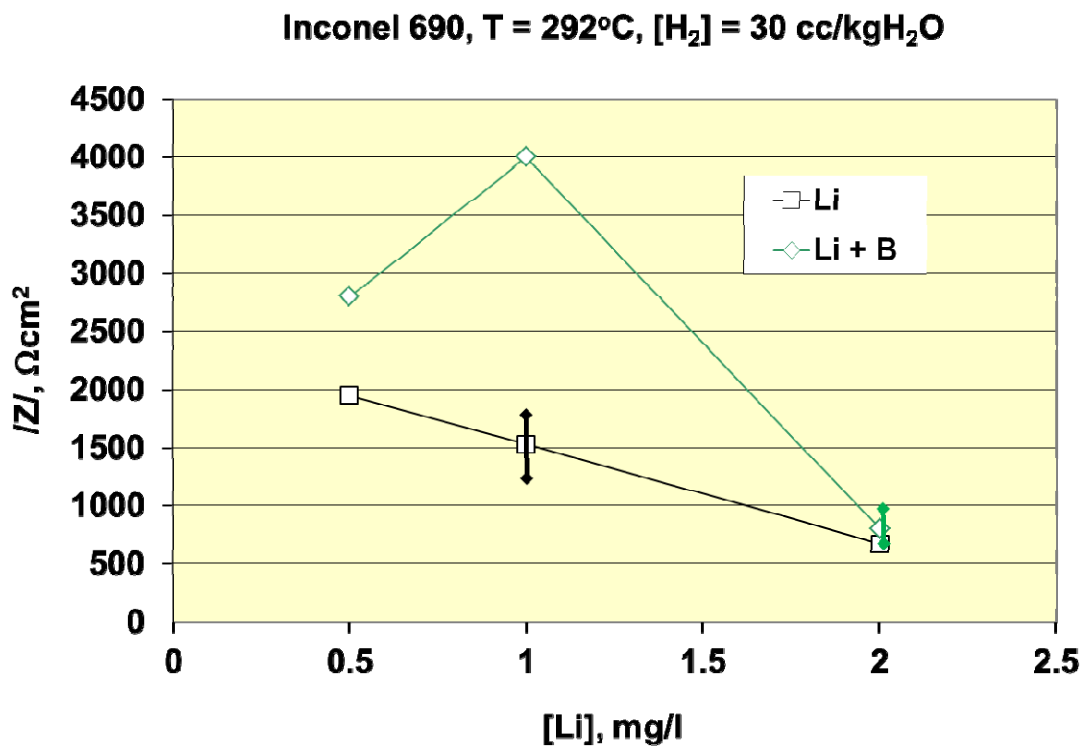
Kuten aikaisemmin kappaleessa 3 on esitetty, voidaan impedanssin arvoa matalilla taajuuksilla käyttää korroosionopeuden mittana, so. mitä suurempi on impedanssin arvo, sen pienempi on korroosionopeus. Yleensä passivoituvilla rakennemateriaaleilla matalilla taajuuksilla mitattu impedanssin arvo on myös maksimiarvo. Taulukkoon 2 on kerätty mitatut maksimi-impedanssiarvot. Mukaan on otettu myös jo aikaisemmin, vuonna 2010 mitatut arvot /6/.

Impedanssispektrien mallinnus ja mallinnuksen kautta saatavat lisätiedot on esitetty viitteissä /6/ ja /7/. Kuvassa 12 on esitetty taulukon 2 arvot kuvaajana, jossa samalla vesikemialla mitatut arvot on esitetty toistomittausten keskiarvona. Mittaustulosten toistettavuus oli melko hyvä, $n. \pm 20\text{...}30\%$ (hajonta merkitty kuvaan niihin pisteisiin, jotka on esitetty keskiarvona). Kuvasta havaitaan, että litiumpitoisuuden kasvaessa $0.5 \text{ mg/l} \rightarrow 2.0 \text{ mg/l}$ (ilman booria) impedanssin maksimiarvo pienentyy kertoimella noin $\times 2.5$ vastaten $n. 60\%$ pienentymistä. Boorin lisääminen kasvattaa impedanssin maksimiarvoa kaikilla litiumpitoisuuksilla, vaikka tasolla $[\text{Li}] = 2.0 \text{ mg/l}$ vaikutus onkin melko vähäinen.

ESCA/XPS –analyysin perusteella korkeampi litiumpitoisuus johtaa paksumpaan passiivikerrokseen suunnilleen samassa altistusajassa. Paksumpi passiivikerros viittaa nopeampaan kerroksen kasvuvauhtiin (nopeampi ionien kulku passiivikerroksen läpi) ja heikompaan suojaavuuteen. Tämä tulos tukee impedanssimittausten tulosta, jonka mukaan korkeampi litiumpitoisuus heikentää passiivikerroksen suojaavuutta, eli kasvattaa korroosionopeutta.

Taulukko 2. Impedanssin maksimiarvot eri vesikemioilla ($T = 292^{\circ}\text{C}$, $\text{H}_2 = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$).

Pvm	[B] / mg/l	[Li] / mg/l	Z / Ωcm^2
09.03.11	0	0.5	1960
30.09.10	0	1.0	1260
31.03.11	0	1.0	1800
13.10.10	0	2	670
09.03.11	0	2.2	680
15.03.11	245	0.5	2600
18.03.11	584	1.0	4200
26.03.11	1200	2.0	560
03.09.10	1200	2.0	870
20.09.10	1200	2.0	980



Kuva 12. Impedanssin maksimiarvo litium-pitoisuuden funktiona.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti litiumin ja boorin vaikutusta Inconel 690 –höyrystinputken pintaan PWR-laitoksen esipassivointia vastaavissa olosuhteissa syntyvän passiivikerroksen ominaisuuksiin. Passivointikäsitteilyn lämpötila oli $T = 292^{\circ}\text{C}$, paine 100 bar ja kaikissa kokeissa veteen liuenneen vedyn määrä oli n. $[\text{H}_2] = 30 \text{ cc/kgH}_2\text{O}$. Passivointikäsitteilyn pituus oli maksimissaan 100 tuntia, ja passivoinnin edistymistä seurattiin in situ sähkökemiallisella impedanssispektroskopiolla. Impedanssin mitattu maksimiarvo korreloi korroosionopeuden kanssa siten, että mitä suurempi on impedanssin arvo, sitä parempi on korroosionkestävyys.

Litiumin määrän kasvun todettiin pienentävän lineaarisesti passiivikerroksen impedanssia, eli kasvattavan korroosionopeutta. Litiumin konsentraation kasvattaminen tasolta $[\text{Li}] = 0.5 \text{ mg/l}$ tasolle $[\text{Li}] = 2.0 \text{ mg/l}$ pienentää passiivikerroksen impedanssia kertoimella n. x2.5. Boorin lisääminen kasvatti mitattua passiivikerroksen impedanssia kaikilla litium-pitoisuuksilla.

Altistuksen aikana syntyneen passiivikerroksen ESCA/XPS –analyysi osoitti, että passiivikerros on voimakkaasti rikastunut kromista, eli kromivalentainen oksidi. Korkeampi litiumpitoisuus tuottaa paksumman, heikommin suojaavan passiivikerroksen.

Lähdeviitteet

1. T. Saario and P. Kinnunen, Literature survey on optimisation of Hot Functional Test procedure. VTT Research Report VTT-R-08070-07, 2008. 15 p.
2. Yamada, E., Suzuki, S., Hirao, T., Hashimoto, Y., Hisamune, K. and Yokoyama, J., "Corrosion rate reduction by chemical control during Hot Functional Testing", Proc. of 1991 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, Fukui, Japan, pp. 151-156.
3. Kadoya, M., "Countermeasures for radiation dose reduction at Ikata Unit No.3", Proc. 10. International congress of the International Radiation Protection Association, Hiroshima (Japan), 14-19 May 2000, paper number P-6a-296, 6 p.
4. Ito, A., Murata, K. and Yokoyama, J., Water chemistry during startup testing at the latest PWR : Genkai Unit No. 4., Proc. 1998 JAIF international conference on water chemistry in nuclear power plants, Kashiwazaki (Japan), 13-16 Oct 1998. pp. 806-811.
5. H. Hayakawa, Y. Mino, S. Nakahama, Y. Aizawa, T. Nishimura, R. Umehara, Y. Shimizu, N. Kogawa and Z. Ojima, Zinc Injection from Hot Functional Test (HFT) in Tomari Unit 3.
6. T. Saario, In situ experimental data on passivation of Alloy 690 in Hot Conditioning water chemistry. VTT Research Report VTT-R-08766-10, 2011. 17 p.
7. I. Betova, M. Bojinov, V. Karastoyanov, P. Kinnunen and T. Saario, Effect of water chemistry on the oxide film on Alloy 690 during simulated hot functional testing of a pressurised water reactor. Paper submitted for publication in Corrosion Science Journal.