



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2010년10월20일  
(11) 등록번호 10-0988856  
(24) 등록일자 2010년10월13일

(51) Int. Cl.  
G21C 19/48 (2006.01) G21C 19/42 (2006.01)  
G21C 19/00 (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2008-0044650  
(22) 출원일자 2008년05월14일  
심사청구일자 2008년05월14일  
(65) 공개번호 10-2009-0118709  
(43) 공개일자 2009년11월18일  
(56) 선행기술조사문헌  
JP2007169733 A  
KR100334253 B1  
US7231714 B2  
US5364513 B1

(73) 특허권자  
한국원자력연구원  
대전 유성구 덕진동 150-1  
(72) 발명자  
이중현  
대전광역시 유성구 상대동 목련아파트 101동 402호  
조수행  
대전광역시 중구 문화1동 센츨파크 203동 1102호  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
황이남

전체 청구항 수 : 총 4 항

심사관 : 김용훈

**(54) 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금**

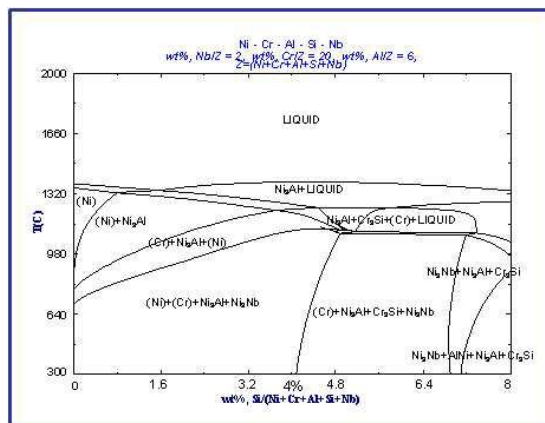
**(57) 요약**

본 발명은 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금에 관한 것이다. 보다 상세하게는 산화물 사용후 핵연료의 전해환원공정은 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염 내에서 핵연료를 음극에 장입하고 전기를 가하여 Li<sub>2</sub>O를 환원시키고 환원된 Li에 의해 핵연료 성분을 환원시키는 공정이다. 이 전해환원공정은 Li<sub>2</sub>O의 강한 부식성과 산소 발생으로 인하여 대부분의 구조용 금속재료에 대하여 화학적으로 매우 가혹한 조건이 된다. 특히 연료성분들은 환원 공정중에 구조용재료와 공정반응을 일으켜 액상을 형성하여 부식이 촉진될 수 있으므로 전해환원공정용 반응기, 구조재 및 전극 등은 약 650℃의 산소, TRU성분 및 용융염 분위기 하에서 내구성이 부여되어야 한다.

본 발명은 니켈 기지내에 고용시킬 수 있는 합금원소를 설계하여 산화성 용융염 분위기 내에서 화학적 안정성을 유지할 수 있는 합금원소를 혼합하여 진공 주조공정을 통해 산화물 사용후핵연료의 전해환원분위기에서 우수한 내식성을 갖는 합금을 제조하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금을 제조한다.

본 발명의 합금은 Cr, Si, Al, Nb 및 Ti양을 조절하여 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염내에서 안정한 산화피막을 형성하여 우수한 내식성을 갖는 합금조성으로써, 상기와 같은 가혹한 조건하에서 내구성을 갖는 구조용 합금을 사용후핵연료 처리 뿐만 아니라, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 모든 재료의 용융염 분위기에서의 환원반응시에도 활용 가능하다.

**대표도 - 도1**



(72) 발명자  
**김응호**  
대전광역시 유성구 신성동 한울아파트 107동 1401호

**박성원**  
대전광역시 유성구 송강동 한마을아파트 113동 407호

---

**특허청구의 범위**

**청구항 1**

Fe 0.01~0.1wt%, Co 0.01~0.1wt%, Mo 0.01~0.1wt%, Cr 0.5~20wt%, Si 0.5~5wt%, Al 1~7wt%, Nb 0.5~2wt%, Ti 0.1~0.5wt% 및 잔부의 니켈로 이루어져 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염내에서 안정한 산화피막을 형성하는 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금.

**청구항 2**

삭제

**청구항 3**

제1항에 있어서, 합금은 산화물 사용후핵연료의 전해환원공정에의 전극 또는 도가니의 구조재 용도로 적용하는 것을 특징으로 하는 합금.

**청구항 4**

제1항에 있어서, 합금은 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>의 일반 공업재료의 환원시 전극 또는 도가니의 구조재 용도로 적용하는 것을 특징으로 하는 합금.

**청구항 5**

Fe 0.01~0.1wt%, Co 0.01~0.1wt%, Mo 0.01~0.1wt%, Cr 0.5~20wt%, Si 0.5~5wt%, Al 1~7wt%, Nb 0.5~2wt%, Ti 0.1~0.5wt% 및 잔부의 니켈을 혼합하고 아르곤 분위기에서 1700℃로 가열하여 용해한 후 예열된 금형에 부어 합금을 제조하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금의 제조방법.

**청구항 6**

삭제

**청구항 7**

삭제

**명세서**

**발명의 상세한 설명**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금에 관한 것으로 니켈 기지내에 고용시킬 수 있는 합금원소를 설계하여 산화성 용융염 분위기 내에서 화학적 안정성을 유지할 수 있는 합금원소를 혼합하여 진공 주조공정을 통해 산화물 사용후핵연료의 전해환원분위기에서 우수한 내식성을 갖는 합금을 제조하는 것을 특징으로 하는 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금을 제조한다. 기지내에 고용시킬 수 있는 합금원소의 양을 이론적으로 계산하는 합금설계단계와, 산화성 용융염 분위기 내에서 화학적 안정성을 유지할 수 있는 재료선정 단계와, 이들 원소를 혼합하여 진공 주조공정을 통해 산화물 사용후핵연료의 전해환원분위기에서 우수한 내식성을 갖는 합금을 제조하는 단계로 구성된다. 본 발명의 합금은 Cr, Si, Al, Nb 및 Ti양을 조절하여 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염내에서 안정한 산화피막을 형성하여 우수한 내식성을 갖는 합금조성을 제공한다.

**배경기술**

[0002] 산화물 사용후 핵연료의 전해환원공정은 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염 내에서 산화물 사용후 핵연료를 음극에 장입하고 전기

를 가하여  $\text{Li}_2\text{O}$ 를 환원시키고 환원된 Li에 의해 핵연료 성분을 환원시키는 공정이다. 이 공정은  $\text{Li}_2\text{O}$ 의 강한 부식성과 양극에서 산소 발생으로 인하여 대부분의 구조용 금속재료에 대하여 화학적으로 매우 가혹한 조건이다. 특히 연료성분들은 환원공정중에 구조용재료와 공정반응을 일으켜 액상을 형성함으로써 부식이 촉진될 가능성이 있다. 따라서 전해환원공정용 반응기 및 구조재 등은 약  $650^\circ\text{C}$ 의 산소, TRU성분 및  $\text{Li}_2\text{O}$ 를 포함한 LiCl용융염 분위기 하에서 내구성이 부여되어야 하나 기존의 상용합금은 이를 만족할만한 내식성을 갖추지 못하여 장시간 운전시 안정성을 확보하지 못했다. 고온 내부식성이 요구되는 합금의 경우 니켈을 기지로한 합금이 주로 사용되고 있다. 특수한 조건에서의 내식성이 요구되는 합금의 경우 용도에 따라 조성을 변화시켜 사용하고 있는데, 미국특허 4,034,142(July 5, 1977), Superalloy base having a coating containing silicon for corrosion/oxidation protection의 경우 gas turbine engine용으로 개발되었으며, 다량의 Co를 함유하고 있을 뿐만 아니라 코팅용 재료로서 개발되어 용융염 분위기에서 사용되는 합금은 아니다. 미국특허 4,818,486(Apr. 4, 1989), Low thermal expansion superalloy의 경우 8wt% Cr, 25wt% Mo, 0.003 wt% B, 1 wt% Fe, 0.5 wt% Mn, 0.4 wt% Si 의 조성을 갖는 Ni기합금으로서 플라즈마 스프레이 세라믹 코팅을 위한 기지재료를 개발을 위해 개발하였으며, 용융염 분위기에서의 내식성은 고려되지 않았다. 미국특허 4,183,774(Jan. 15, 1980), High-endurance superalloy for use in particular in the nuclear industry의 경우 0.2~1.9 wt% C, 18~32%Cr, 1.5~8 wt% W, 15~40%Ni, 6~12 wt% Mo, 0~3wt%Nb-Ta, 0~2wt%Si, 0~3wt% Mn, 0~3wt%Zr, 0~3wt% V, 0~0.9wt%B, <0.3wt%Co 의 조성을 지니는 철, 니켈 혹은 코발트 기지 합금이며, 사용용도에 있어서 전해환원 용융염 분위기가 고려되지 않았고, 본 특허와는 상이한 조성을 지닌다. 따라서 아직 LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$ 계 용융염계에서 우수한 내식성을 지닌 합금에 대해서는 보고되지 않고 있다.

**발명의 내용**

**해결 하고자하는 과제**

- [0003] 산화물 사용후 핵연료를 처리하기 위하여 우리나라를 비롯한 미국, 일본 등의 선진국에서도 활발하게 연구하고 있는 실정으로 산화물 사용후핵연료를 처리하기 위하여 LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$  용융염 분위기에서 전해환원을 통한 금속화 연구를 진행하고 있다. 이렇게 금속화된 사용후핵연료는 용융염전해정련공정을 거쳐 직접 고속로용 금속핵연료로 제조 가능하므로 매우 효과적인 산화물사용후핵연료 처리방안으로 여겨지고 있다. 그러나 전해환원 전해질인 LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$  용융염은 상용구조재에 대하여 매우 강한 부식성을 지니고 있어 고도의 신뢰성이 요구되는 전해환원 장치의 구조재 선정에 큰 어려움을 겪고 있다.
- [0004] 현재 개발된 상용 내부식합금은 주로 고온의 산화성 기체 혹은 산화성 수용액 내에서의 부식저항성을 부여하기 위해 설계된 합금이 주종을 이루고 있는 반면에, 사용후핵연료의 전해환원조건인  $650^\circ\text{C}$ 의 LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$  용융염 하에서 내부식성을 나타내는 합금은 아직까지 개발되지 못하고 있으며, 상용합금에 대한 실험결과 모두 기준치 (0.5 mm/yr) 이상의 부식속도를 갖는 것으로 조사되었다. 상용합금 중에서 가장 우수한 내부식성을 나타낸 Inconel 713 LC기준으로 전해환원조건인 LiCl-3wt% $\text{Li}_2\text{O}$ 용융염 분위기에서 측정된 부식속도는 1.5mm/yr 이상으로써, 이는 공업적인 용도로 사용이 어려우며, 특히 고도의 신뢰성이 요구되는 Hot cell조업조건에서는 보다 낮은 부식속도를 갖는 재료가 요구되고 있다.
- [0005] 본 발명은 기존의 상용합금 중, LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$  분위기 하에서 내식성 향상에 기여한 합금원소들을 선별하고, 그 외에 상용합금에서는 사용되지않는 Si의 합금 가능 량을 이론적으로 계산하여 이들 합금 조합을 통하여 새로운 소재를 개발하였으며, 이들 합금 소재가 LiCl- $\text{Li}_2\text{O}$  용융염 분위기 하에서 우수한 내식성을 갖는다는 사실을 검증하였음. 부식실험결과 약 0.3 mm/yr 의 부식속도를 나타내어 상용 Inconel 713LC대비 5배(500%)의 내부식성을 나타냈다.
- [0006] 본 발명은 기존의 상용합금이 지니지 못한  $650^\circ\text{C}$ 이하의  $\text{Li}_2\text{O}$ -LiCl 용융염에 대한 내부식성을 부여하기 위하여 니켈을 주성분으로 하고 다양한 합금원소를 조합하여 내 부식성을 획기적으로 향상시킴으로서 산화물 사용후 핵연료의 전해환원조건에서 장시간 안정적으로 사용 가능한 니켈기 합금을 개발하는데 있다. 본 특허에서 제안하고 있는 합금은 니켈을 주성분으로하고, 산화물 사용후 핵연료의 전해환원조건에서 자체 합금원소 성분에 의해 표면에 안정한 부동태 피막을 형성함으로써 지속적인 부식이 발생하지 않고 장시간 내부식성을 유지하는 합금 조성을 개발하는 것이다. 이를 위하여 니켈 기지내에 고용시킬 수 있는 합금원소의 이론적인 양을 계산하는 합금 설계단계, 산화성 용융염 분위기 내에서 화학적 안정성을 위치할 수 있는 합금원소의 선정단계 및 합금 원소

를 혼합하여 진공 주조공정을 통해 합금을 제조하는 단계를 통하여 산화물 사용후핵연료의 전해환원분위기에서 우수한 내식성을 지니는 합금을 제조하고 자 한다.

**과제 해결수단**

[0007] 본 발명은 기존의 상용합금 중, LiCl-Li<sub>2</sub>O 분위기 하에서 내식성 향상에 기여한 합금원소들을 선별하고, 그 외에 상용합금에서는 사용되지 않는 Si의 합금 가능량을 이론적으로 계산하여 이들 합금 조합을 통하여 새로운 소재를 개발하는 데 있다. 이들 합금 소재가 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염 분위기 하에서 부식실험한 결과에 의하면 우수한 내식성(약 0.3 mm/yr의 부식속도)으로 상용 Inconel 713LC대비 5배(500%효과)의 내부식성을 나타내었다.

[0008]

**효과**

[0009] 본 발명에서 개발된 산화저항성 니켈합금을 채택하면 구조재의 내부식성을 대폭 향상시킬 수 있어 공정장치의 신뢰성을 높일 수 있으며, 유지보수에 필요한 운전정지 기간을 단축시키고, 폐기물 발생량을 줄여 전해환원 효율 향상을 통해 상용화를 한층 앞당길 수 있을 것이다. 또한 사용후핵연료의 처리시 뿐만 아니라 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 일반적인 공업재료의 환원시에도 내부식 구조재로 활용 가능한 특징을 지니고 있어 관련 기술의 산업화에도 크게 기여할 수 있다.

**발명의 실시를 위한 구체적인 내용**

[0010] 본 발명은 니켈기지에 Cr, Si, Al, Nb 및 Ti을 첨가하여 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염내에서 안정한 산화피막을 형성하는 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금을 나타낸다.

[0011] 상기에서 합금원소의 조성은 중량을 기준하여 Fe, Co, Mo 각각 0.1wt%이하, 바람직하게는 Fe, Co, Mo 각각 0.01~0.1wt%, Cr 0.5~20wt%, Si 0.5~5wt%, Al 1~7wt%, Nb 0.5~2wt%, Ti 0.1~0.5wt% 및 잔부의 니켈을 포함한다.

[0012] 상기의 합금은 산화물 사용후핵연료의 전해환원공정에 적용하여 전극 및 도가니의 구조재로 사용할 수 있다.

[0013] 상기의 합금은 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>의 일반 공업재료의 환원시 전극 및/또는 도가니의 구조재로 사용할 수 있다.

[0014] 본 발명은 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금의 제조방법을 나타낸다. 이때 사용후핵연료 전해환원장치의 산화저항성 구조재료용 합금 제조시 합금원소는 Fe, Co, Mo의 함유량을 각각 0.1wt% 이하, 바람직하게는 Fe, Co, Mo 각각 0.01~0.1wt%로 하고, Cr함유량을 0.5~20wt%, Si함유량을 0.5~5wt%, Al 함유량 1~7wt%, Nb 함유량을 0.5~2wt%, Ti 함유량을 0.1~0.5wt% 및 잔부의 니켈을 포함할 수 있다.

[0015] 삭제

[0016] 삭제

[0017] 삭제

[0018] 이하 본 발명을 보다 상세히 설명하고자 한다.

[0019] 산화물 사용후 핵연료의 전해환원공정은 650℃의 LiCl-3wt%Li<sub>2</sub>O 용융염 내에서 음극에 산화우라늄을 장입시키고, Li을 환원시켜 산화우라늄을 간접환원시키는 전기화학적 처리공정이다. 이때 산소이온은 양극에서 가스로 방출되는데, 고온에서의 산소발생과 용융염내의 Li<sub>2</sub>O는 대부분의 구조재료에 대해 강한 부식성을 나타내므로 높은 신뢰성이 요구되는 사용후핵연료 처리용 구조재료 선정시에 큰 문제점으로 여겨지고 있다. 현재까지 사용되

고 있는 구조용재료는 주로 스테인레스강과 일부 니켈기 초합금이 비교적 우수한 내식성을 나타내는 것으로 조사되었으나 장시간 운전시에 건전성이 충분치 않아 양산규모의 장치를 위한 구조재료는 새로운 재료의 개발이 필요하다. 특히 대부분의 구조재료는 U 및 Pu와 낮은 공용온도를 지니며 Al, Ni, Cr 및 Fe 등의 구조재는 전해 환원공정 온도인 650℃보다 낮은 온도에서 연료성분과 공정반응을 나타내므로 환원이 진행됨에 따라 구조재에 액상을 형성시켜 부식을 촉진시킬 우려가 있다. 따라서 금속재와 연료성분의 직접적인 접촉을 방지해야하며 이를 위해 전해환원조건에서 적절한 산화피막을 형성할 수 있는 합금 조성이 필요하다. 또한 내부식재료에 있어서의 부동태 산화피막은 부식성 분위기에서의 화학적 안정성 뿐만 아니라 산화물층과 금속기지지재와의 열팽창계수 차이에 의한 박리현상도 고려해야 된다. 특히 본 특허와 같은 용융염계에서는 산화물층과 금속기지지재와의 열팽창계수차이에 의해 생성된 산화피막의 균열이나 기공을 통해 용융염의 침투가 발생할 경우 내식성이 크게 저하되므로 금속기지지재의 열팽창계수도 고려대상중의 하나이다.

- [0020] 본 발명의 최종적인 목표는 전해환원용 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염이라는 특수한 매질 내에서 우수한 내부식 특성을 나타낼 수 있는 합금개발로서, 니켈과 고용체를 이룰 수 있는 각 합금원소들의 조합을 찾아내는 것이므로 상기 원소 외에 특별히 배제되어야 하는 합금원소들이 존재한다.
- [0021] 니켈합금내의 Mo은 Ni와 고용체를 형성하며 강도 향상효과가 있으나, LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서 산화물 계면에 농축되는 거동을 보이며, 내식성 향상에는 큰 역할을 하지 못하므로, 본 특허에서는 배제되었다.
- [0022] 니켈합금내의 Fe, Co는 역시 고용강화효과가 있으나 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서는 안정된 산화피막의 형성을 방해하므로, 본 발명의 합금 시스템에서는 배제되었다. 반면 Al, Nb는 니켈과 금속간화합물을 형성하여 강도 향상의 효과가 있으며, Al의 경우는 특히 안정한 부동태 피막을 형성하여 내부산화를 억제하므로 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 시스템에서 니켈합금에 첨가되어야 할 필수적인 원소이다.
- [0023] Cr의 경우도 Ni에 매우 큰 고용도를 지녀 고용강화원소로 매우 효과적으로 사용될 수 있으며, 역시 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서 합금 표면에 Cr 산화물을 형성하므로 산화를 억제하는 효과를 지니고 있다.
- [0024] Si의 경우는 Ni에 상당량의 고용도를 지니며 매우 작은 열팽창계수를 지니고 있어 산화물 피막의 박리를 방지하는데 유리한 합금일 뿐만 아니라 표면에 안정한 부동태 피막을 형성하여 산화를 억제시킬 수 있는 중요한 합금 원소이다.
- [0025] 일반적으로 이원계 합금의 경우 상평형은 기존 문헌에 잘 보고되어 있다. 그러나 3원계 이상의 상태도는 일부 합금계를 제외하고는 정보가 제한되어 있으며, 본 특허에서 고려하고 있는 5원계 합금의 경우는 계의 복잡성으로 인하여 이론적 계산에 의한 예측법이 유일하다. 이를 위하여 상용 열역학 데이터베이스인 FACTSage를 이용하여 Ni-Cr-Al-Si-Nb계에 대한 상태도를 도 1 및 2와 같이 작성하였다.
- [0026] 먼저 2 wt% Nb, 20wt% Cr, 6 wt% Al을 함유한 Ni기 합금에 Si의 양을 증가시킬 경우, 4wt%까지는 Si가 Ni에 고용체를 형성하며 그 이상 증가시킬 경우 Cr<sub>3</sub>Si와 같은 금속간 화합물을 형성한다. 이처럼 Si함유 금속간 화합물이 발생하게 되면 재료의 취성이 증가되며, 부식에 대한 민감성이 증대되어 내부식성이 저하될 것으로 예상되어 Si의 첨가량은 약 4%이하로 제한된다. 한편, Cr의 함량을 12wt%로 유지시킬 경우는 도 2와 같이 Ni합금에 대한 Si의 용해도가 5wt%까지 증가함을 알 수 있다.
- [0027] 이러한 조성을 바탕으로 니켈과 각 합금원소를 진공 용해주조하여 니켈합금을 제조한다. 이렇게 제조된 니켈합금은 사용후핵연료의 전해환원공정 뿐만 아니라 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 일반적인 공업재료의 환원시에도 활용 가능하다.
- [0028] 본 발명에서 제시하는 니켈합금개발 기술의 특징을 요약하면, 1) LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서 우수한 내식성을 나타내는 합금이고, 2) 합금원소중 Fe, Co, Mo을 제거하고 Cr, Si, Al, Nb 및 Ti양을 조절하여 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 내에서 안정한 산화피막을 형성하는 합금조성이며, 3) 발명을 통하여 조사된 합금원소함량은 Cr함량 12wt%이내, Si함량 5wt%이내, Al 함량 6wt%이내, Nb 2 wt%이내, Ti 0.5 wt% 이내로서, Fe, Co 및 Mo은 0.1, 0.06 및 0.01 wt% 이내로 최대한 감소시킨 조성이다. 4) 제조된 니켈 합금은 사용후핵연료의 처리시 뿐만 아니라 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 일반적인 공업재료의 환원시에도 활용 가능한 특징을 지닌다.



[0029] 이하 본 발명을 하기의 실시예에 의해 보다 상세히 설명하고자 한다. 그러나 하기 실시예는 본 발명의 일실시예로서 이들에 의해 본 발명의 권리범위가 한정되는 것은 아니다.

[0030] <실시예>

[0031] 상기를 바탕으로 하여 새로운 합금을 설계하였으며, 표 1과 같은 합금조성을 갖는 4가지의 Ni기 합금 잉곳을 제조하였다. 기존의 Ni기 초합금에서 흔히 첨가되는 고용강화 합금원소인 Fe, Co 및 Mo은 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서 높은 부식성을 나타내므로 본 합금설계시에는 배제되었다.

[0032] 표 1. 제조된 합금 조성

[0033]

Alloy	Ni	Cr	Fe	Co	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	Ta	Mo*	Zr	Y
N-1	Bal	12.1	0.11	0.064	0.061	1.9	<0.02	<0.005	<0.002	5.8	0.5	2.0	<0.003	-	-	-
N-2	Bal	12.2	0.15	0.06	0.04	4.9	<0.02	<0.005	<0.002	6.3	0.5	2.1	-	-	-	-
N-3	Bal	20.2	0.12	0.05	0.036	4.5	<0.02	<0.02	<0.02	6.3	0.51	2.0	<0.003	-	-	-
N-4	Bal	12.1	0.11	0.065	0.06	2.0	<0.02	<0.005	<0.002	5.8	0.50	2	<0.003	0	0.15	<0.05

[0034] 합금의 제조는 각 조성별로 혼합된 원료 50kg을 아르곤 분위기에서 1700℃로 가열하여 용해한 후 예열된 금형에 부어 제조하였으며, 금형 상부에는 hot top을 설치하여 응고시 발생하는 수축공이 제품 내부에 발생하는 것을 방지하였다. 부식시험은 용융염의 출발원료인 LiCl-3%Li<sub>2</sub>O를 MgO 실험도가니에 넣고 아르곤 분위기에서 가열한 후 300℃ 근처에서 수분 pickup을 제거하기 위하여 약 3시간 동안 아르곤가스를 공급하면서 가열하였다. 이후 650℃로 가열하여 혼합 용융염을 제조하였다. 시편은 로내에 미리 장착하여 부식환경온도까지 도달하면 시편을 용융염에 침지시킨 후 용융염 중에 알루미늄나 튜브(6φ)를 통해 혼합가스를 공급하면서 부식시험을 행하였다. 부식환경온도는 전해환원공정이 이루어지는 650℃를 선택하였으며, 부식시험시간은 1~9일, 2mL/min의 flow로 Ar-10%O<sub>2</sub> 혼합가스분위기에서 부식시험을 행하였다. 반응시간에 도달하면 시편을 용융염으로부터 분리시켜 아르곤 분위기에서 로냉한 후 시편을 증류수에서 초음파 세척하여 용융염을 제거하고 건조로에서 24시간 이상 건조한 다음 무게변화를 측정하였다. 부식생성물의 분석, 미세조직 관찰을 위해 XRD(X-Ray Diffractometer, Rigaku, DMAX/1200), SEM(Scanning Electron Microscope, Jeol, JSM-6300)과 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Jeol, JSM-6300)를 사용하여 분석하였다.

[0035] 일련의 부식시험을 통해 부식속도를 측정한 결과 도 3과 같이 기존 상용 니켈기 합금인 Inconel 713LC보다 내부 식성이 월등히 향상된 합금을 제조할 수 있었으며, 공업적으로 요구되는 부식속도인 0.5mm/yr보다도 낮은 부식속도를 얻을 수 있었다. 이렇게 N-1 및 N-2합금에서 우수한 내식성이 얻어진 이유는 도 4에 나타난 바와 같이 LiCl-Li<sub>2</sub>O 용융염 내에서 각 합금원소로 구성된 산화피막이 형성되었기 때문인 것으로 확인되었으며, 반면 상대적으로 높은 부식속도를 나타낸 N-3 합금의 경우 높은 Cr함량으로 기인된 것으로 판단되는 합금원소의 불균일 분포가 관찰되었고, Si성분의 산화물이 표면에 존재하지 않는 것으로 관찰되었다.

[0036] 상기에서의 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 당해 발명이 속하는 기술 분야에서 숙련된 당업자는 하기 특허청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않은 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

**산업이용 가능성**

[0037] 본 발명의 합금은 기존의 재료가 산화저항성을 지니지 못하는 650℃의 LiCl-Li<sub>2</sub>O용융염 분위기에서 자체 합금성분에 의해 재료표면에 안정한 산화물 피막을 형성함으로써 전해환원분위기에서 장시간 안정성을 유지할 수 있어 양산처리규모의 전해환원장치를 개발하는데 크게 기여할 수 있다. 또한 제조된 니켈 합금은 사용후핵연료의 처리시 뿐만 아니라, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> 등 일반적인 공업재료의 환원시에도 내부식 구조재로 활용되어 관련 기술

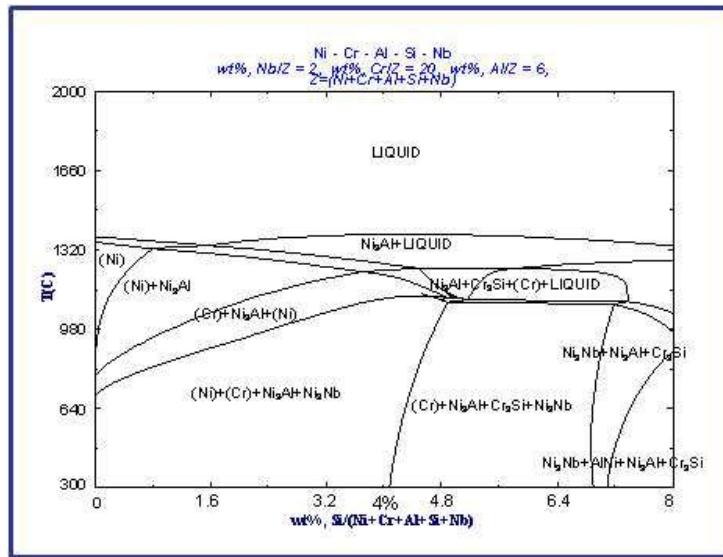
의 산업화에도 크게 기여할 수 있으므로 산업상 이용가능성이 크다.

**도면의 간단한 설명**

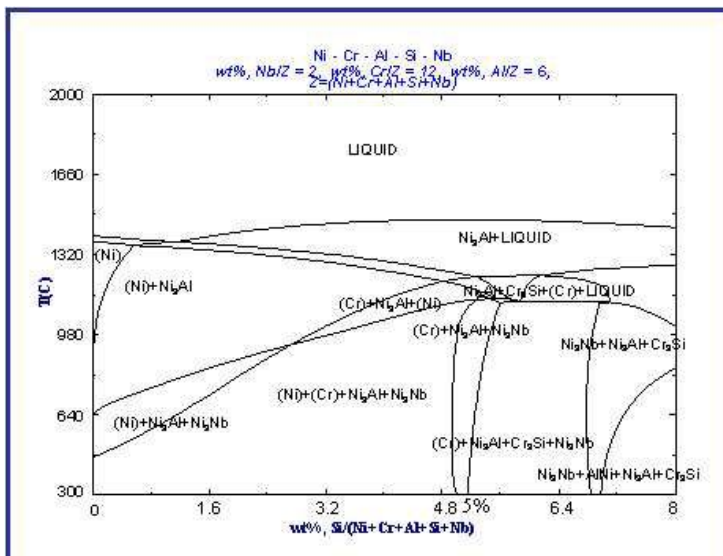
- [0038] 도 1은 FACTSage에 의해 계산된 Pseudo-binary Ni-Cr-Al-Si-Nb 합금 상태도 (20 wt % Cr)이다.
- [0039] 도 2는 FACTSage에 의해 계산된 Pseudo-binary Ni-Cr-Al-Si-Nb 합금 상태도 (12 wt % Cr)이다.
- [0040] 도 3은 설계된 합금의 650℃시험 온도에서의 부식속도이다.
- [0041] 도 4는 N-2합금의 부식실험후 시편의 표면 관찰 SEM-EDX분석결과이다.

**도면**

**도면1**

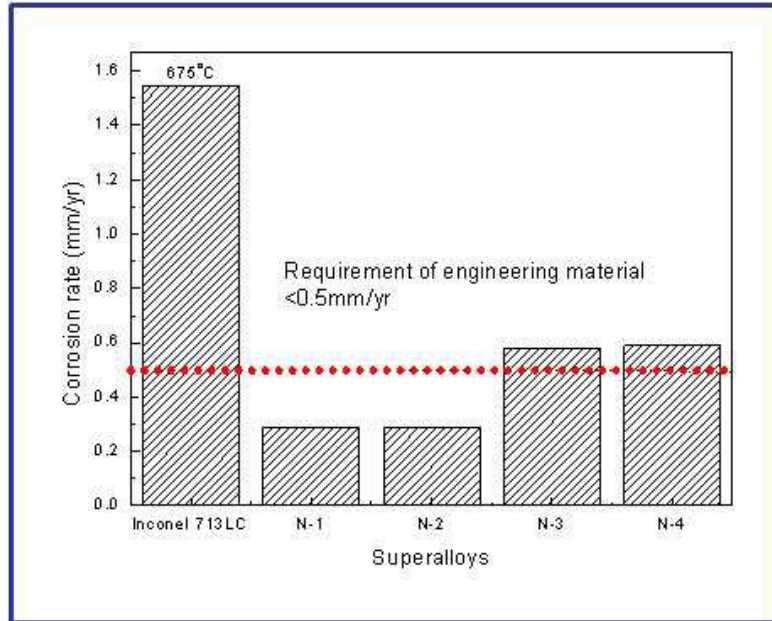


**도면2**





도면3



도면4

