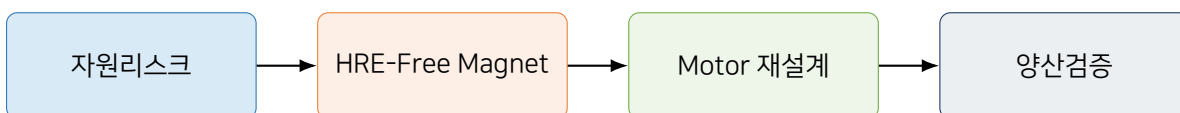


HRE-Free Magnet 적용기술보고서

요구배경·개발역사·Motor 설계영향·Maxwell 감자해석



Contents

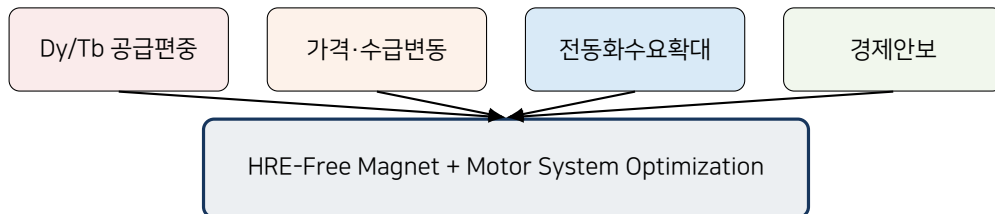
1	Executive Summary	3
2	HRE-Free 의정확한의미	3
2.1	Rare Earth, Heavy Rare Earth, HRE-Free 의구분	3
2.2	왜 Dy/Tb 를넣어왔는가?	3
3	왜일본은 HRE-Free 를개발하는가? - 요구배경상세	3
3.1	1) 자원편재와공급망리스크	4
3.2	2) 2010 년대이후 '소재문제' 가 '산업안보문제' 로확대	4
3.3	3) EV/HEV 확대에따른수요의구조적증가	4
3.4	4) 가격변동과 BOM 안정성	4
3.5	5) 일본의강점인소재-부품-모터통합개발과잘맞는다	4
3.6	6) 고객사양화의이유	4
4	개발역사: 소재저감에서시스템최적화까지	4
4.1	개발흐름을한눈에보기	4
4.2	Phase A - 기존고온 NdFeB: Dy/Tb 첨가로안전마진확보	4
4.3	Phase B - '적게쓰기': Grain Boundary 중심의 HRE 효율화	5
4.4	Phase C - '안쓰기': 미세결정과입계제어를통한 HRE-Free	5
4.5	2016 - Honda × Daido: HRE 완전 Free 의양산전환점	5
4.6	2018 - 적용확대와냉각기술의역할	5
4.7	2018 - Toyota: HRE-Free 에서 Nd-Reduced 로확장	5
4.8	2024 이후 - 경제안보기술로격상	5
5	일본 HRE-Free 개발역사: 정책·소재·양산의연결	5
5.1	2000 년대후반 - Dy 절감이국가 R&D 과제로전환	5
5.2	2010-2014 - 공급충격이후 Reduce, Recycle, Diversify 의병행	5
5.3	2014-2021 - 'Dy 를쓰지않는고성능자석' 이명시적목표가됨	6
5.4	2016 - Honda × Daido: HRE-Free 의 '양산가능성' 을증명	6
5.5	2018 - Honda Insight: 더높은출력영역으로확대	6
5.6	2018 - Toyota: HRE-Free 에서 Nd-Reduced 로자원전략확장	6
5.7	2020 년대 - 공급망강인화에서경제안보핵심기술로	6
6	Dy/Tb 저감기술의발전과정	6
6.1	Step 1 - Bulk alloying: 가장확실하지만자원효율이낮은방식	6
6.2	Step 2 - Grain refinement: 감자 nucleation site 자체를줄임	6
6.3	Step 3 - Grain Boundary Diffusion: HRE 를 '필요한곳에만' 배치	7
6.4	Step 4 - Grain-boundary chemistry control: HRE 없이자기적분리강화	7
6.5	Step 5 - Hot deformation: 미세결정·배향·형상제조의통합	7
6.6	Step 6 - Nd-efficient / composition engineering: 희소원소의범위를더넓게최적화	7
7	대표사례심층분석	7
7.1	Honda × Daido: Material-Motor Co-design 의교과서적사례	7
7.2	Honda 2018 Insight: Cooling 을 '자석성능' 의일부로취급	7
7.3	Toyota: 자원사용량을 magnetic microstructure 로재배치	7
7.4	NEDO: 소재-모터-공급망을하나의기술시스템으로정의	8
8	기술개발의핵심: 자석에서 Motor System 으로	8
9	HRE-Free 가 Motor 설계에미치는영향	8
10	전동기설계관점의기술적의미	8
10.1	1) Magnet specification 이 '재료상수' 에서 '운전영역데이터' 로바뀐다	8
10.2	2) Rotor geometry 가자원리스크대응수단이된다	8
10.3	3) Peak torque 와 Field Weakening 의설계우선순위가높아진다	9
10.4	4) Cooling 은 BOM cost 와공급망을움직이는설계변수다	9
10.5	5) Br-Hcj trade-off 를 torque density 관점에서다시봐야한다	9
10.6	6) NVH 와기계강도는 HRE-Free 의간접영향항목이다	9
10.7	7) 양산품질은평균값보다 lower-tail 관리가중요하다	9
10.8	설계 Trade-off Matrix	9

11 Aisin 등일본고객과의기술협의시확인사항	10
12 Maxwell HRE-Free Demagnetization Analysis Procedure	10
12.1 해석구조	10
12.2 권장 Case Matrix	10
12.3 평가 KPI	10
13 HRE-Free 설계검증프로세스와의사결정기준	11
13.1 Stage-Gate 제안	11
13.2 권장의사결정 Logic	11
14 설계최적화방향	11
15 개발로드맵관점의정리	12
16 기술성숙도와향후개발방향	12
16.1 HRE-Reduced 와 HRE-Free 는당분간공존할가능성이높다	12
16.2 기술옵션별상대비교	12
16.3 2026 년시점의설계조직에필요한역량	13
16.4 향후기술방향	13
17 Aisin 프로젝트적용을위한실무권고	14
17.1 개발회의용핵심질문 8 개	14
18 Aisin 대응실무판: Magnet Grade 에서 Demag Margin 까지	15
18.1 실무판의목적과적용원칙	15
18.2 B_r/H_{cj} -온도-감자 Margin 비교	15
19 IPM Rotor 의 Edge/Corner 역자계와감자시작점	16
19.1 왜평균자계가아니라국부값을보아야하는가?	16
19.2 Edge/Corner 감자를키우는설계인자	16
19.3 설계변경의우선순위	16
20 Maxwell 2D/3D Demagnetization Design Guideline	16
20.1 해석모델의기본요구사항	16
20.2 권장 Case Matrix - Aisin 실무용	17
20.3 2D 와 3D 의역할분담	17
20.4 Post-demag 판정 KPI	17
21 Aisin Design Review 용 Demagnetization 판정 Flow	18
21.1 Gate 방식의승인절차	18
21.2 고객에게받아야할최소입력데이터	18
21.3 Aisin 제출자료권장 1-page Summary	18
22 결론및실무제안	19
23 참고문헌및공개자료	19

1. Executive Summary

HRE-Free는 단순히 “희토류를 쓰지 않는 자석”을 의미하지 않는다. 자동차용 Nd-Fe-B 자석에서 고온보자력을 높이기 위해 사용해 온 **Dy(디스프로슘), Tb(터븀) 등 Heavy Rare Earth(HRE)를 줄이거나 제거**하면서도, 구동 모터에 필요한 고온감자내력과 출력 밀도를 유지하려는 기술이다. Nd 자체는 일반적으로 남아있으므로 Rare-Earth-Free와는 구분해야 한다.

일본에서 HRE-Free가 강하게 추진된 배경은 네 가지가 중첩되어 있다. 첫째, Dy/Tb 의존지·정제공급망편중에서 따른 **경제안보와 조달 리스크**. 둘째, HEV/EV 확대에 따라 고성능 자석 수요가 커지는 상황에서 **가격·수급 변동성**. 셋째, 자석 재료 자체의 고성능화뿐 아니라 모터 냉각·자기회로·제어까지 포함해 HRE 사용을 줄일 수 있게 된 **설계 기술의 진보**. 넷째, 일본 정부·산업계가 소재, 자석, 모터를 하나의 전략 공급망으로 보고 장기 연구 개발을 지원해 온 점이다. NEDO는 2014~2021년 고효율 모터용 자성 재료 사업에서 공급 위험이 큰 Dy를 사용하지 않는 고성능 자석을 핵심 목표로 두었고, 2024년에는 경제안보 중요 기술 육성 프로그램에서 HRE-Free/rare-earth-free 자석과 그 특성에 맞춘 차세대 모터를 함께 개발하는 사업을 시작했다.



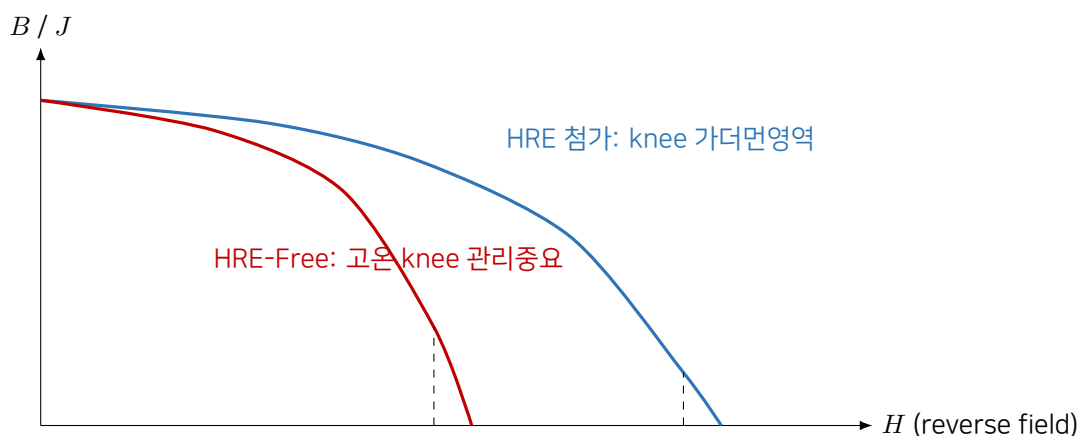
2. HRE-Free의 정확한 의미

2.1 Rare Earth, Heavy Rare Earth, HRE-Free의 구분

용어	의미	전동기관점
Nd-Fe-B Magnet	Nd, Fe, B를 기본으로 하는 고에너지 영구 자석	높은 B_r , 높은 출력 밀도 확보에 유리
HRE	일반적으로 Dy, Tb 등 중희토류를 지칭	NdFeB의 고온 H_{cj} 향상에 사용
HRE-Reduced	Dy/Tb 사용량을 저감	Grain Boundary Diffusion 등으로 사용량 최적화
HRE-Free	Dy/Tb 등 HRE를 사용하지 않는 방향	자석 미세조직 + 모터 설계로 감자내력 확보 필요
Rare-Earth-Free	Nd까지 포함하여 희토류를 사용하지 않음	ferrite, Fe-N 계열 등 전혀 다른 자석/모터 설계 영역

2.2 왜 Dy/Tb를 넣어왔는가?

자동차 구동 모터의 자석은 높은 온도와 강한 역자계에 동시에 노출된다. NdFeB는 온도가 상승하면 보자력이 감소하고, Field Weakening 의존음의 I_d 또는 Peak/Fault current에서는 자석의 동작점이 demagnetization curve의 knee 쪽으로 이동한다. 전통적으로 Dy/Tb 첨가는 고온보자력 H_{cj} 를 높이는 가장 직접적인 방법이었다.



개념도이며 특정 자석 Grade의 실제 B-H/J-H 수치를 의미하지 않는다.

3. 왜 일본은 HRE-Free를 개발하는가? - 요구배경상세

3.1 1) 자원편재와공급망리스크

Dy/Tb 는자동차용고온 NdFeB 에서매우유용하지만희소하고공급원이편중되어있다. Honda 는 2016 년 HRE-free 자석양산적용발표에서유력광상이세계적으로편재되어있고, 안정조달과재료비관점의리스크가있다고명시했다. Toyota 도 2018 년 Tb/Dy 를희소하고고가이며지정학적리스크가높은소재로설명했다. 따라서일본제조사입장에서 HRE-Free 는단순구매단가절감보다 “필요한때필요한양을지속적으로확보할수있는가”라는장기양산리스크의문제다.

3.2 2) 2010 년대이후 ‘소재문제’ 가 ‘산업안보문제’ 로확대

희토류공급불안은일본에서자석을특정부품의재료문제가아니라산업경쟁력과경제안보문제로인식하게한계기가되었다. 이후정책은대체재개발, 사용량저감, 재활용, 공급선다변화를병행하는방향으로전개되었다. NEDO 의사용후모터희토류자석재활용사업 (2012-2014), 고효율모터용자성재료사업 (2014-2021), 최근의 HRE-Free/rare-earth-free 자석및모터공동개발사업은이흐름의연장선으로볼수있다.

3.3 3) EV/HEV 확대에따른수요의구조적증가

전동차량의구동모터는높은토크밀도, 소형화, 고효율을요구하기때문에고성능 NdFeB 의전략적가치가크다. Honda 는 2016 년전동차확대에따라 Nd 자석수요의급증을예상했고, Toyota 는 2018 년에는 Dy/Tb 뿐만아니라장기적으로 Nd 자체도공급부족가능성이있다고보아 Nd 사용량저감까지개발범위를확대했다. 즉기술의방향은 HRE 사용량저감 → HRE-Free → Nd 사용량저감 → 궁극적 rare-earth-free 후보탐색으로넓어지고있다.

3.4 4) 가격변동과 BOM 안정성

자동차는개발후장기간대량생산되므로원재료가격의급격한변동은프로그램수익성을훼손한다. Dy/Tb 의존도를낮추면자석단가자체뿐만아니라장기계약, 재고, 공급중단대응비용까지포함한총리스크를줄일수있다. 따라서 HRE-Free 는 “현재최저가” 보다수년간의가격·조달예측가능성을높이는기술로이해하는것이적절하다.

3.5 5) 일본의강점인소재-부품-모터통합개발과잘맞는다

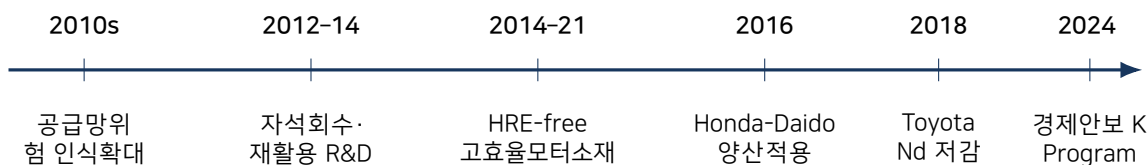
HRE-Free 는자석만바꾸면성립하기어렵다. 자석의고온보자력 margin 이작아질수록모터의자속경로, magnet thickness, bridge/rib, 냉각, 전류각, 최대 $-I_d$ 가중요해진다. Honda/Daido 사례가대표적이다. Daido 는미세결정의 hot-deformed NdFeB 를개발하고 Honda 는 magnet/rotor 형상과 magnetic flux path 를재설계했다. 2018 년중형하이브리드적용에서는 shaft 내부로 ATF 를공급하는 rotor 직접냉각까지결합했다. 이처럼 자석성능의일부를시스템설계로보완할수있다는점이일본업체의 HRE-Free 추진력을높였다.

3.6 6) 고객사양화의이유

완성차또는 Tier-1 이 HRE-Free 를 RFQ/설계요구사항에넣는것은소재팀의취향이아니라, 프로그램전체의공급망정책을설계초기부터고정하려는의미가크다. 양산직전에 HRE-free 로변경하면 rotor magnetic circuit, demagnetization, cooling, inverter current limit, durability validation 을다시해야할수있기때문이다. 따라서초기요구사항에 HRE-Free 를명시하면공급업체가처음부터해당 constraint 안에서설계하도록만들수있다.

4. 개발역사: 소재저감에서시스템최적화까지

4.1 개발흐름을한눈에보기



4.2 Phase A - 기존 고온 NdFeB: Dy/Tb 첨가로 안전마진 확보

HEV 구동모터는 고온과 큰 전기적 부하를 받기 때문에 과거에는 Dy 를 상당량 포함한 고보자력 NdFeB 가 일반적인 해법이 었다. 일본 문부과학성 (MEXT) 의 Element Strategy 소개 자료는 과거 HEV traction motor 용자석에서 Dy 가 8-10 wt.% 수준 필요했던 사례를 설명한다. 이 방식은 고온 감자에 강하지만 HRE 공급 리스크와 비용, 그리고 Dy 첨가에 따른 잔류 자속 밀도 측면의 trade-off 를 가진다.

4.3 Phase B - '적게쓰기': Grain Boundary 중심의 HRE 효율화

다음단계는 HRE 를자석전체에많이넣기보다, 보자력향상에효과적인결정립계주변에집중시키는방향이다. 핵심아이디어는 **같은 Dy/Tb 를더효율적으로사용하는것이다**. 이단계에서자석제조기술은단순합금조성경쟁에서미세조직·입계제어경쟁으로이동했다.

4.4 Phase C - '안쓰기': 미세결정과입계제어를통한 HRE-Free

HRE 를완전히제거하려면 NdFeB 자체의보자력발생메커니즘을개선해야한다. Daido 의 hot deformation 방식은일반적인 sintered magnet 보다매우미세한결정립을얻을수있어 HRE 없이도높은보자력과내열성을확보하는데유리했다. MEXT 자료에따르면 grain-boundary phase 제어등을통해 Dy 4-5 wt.% 를포함한 sintered magnet 수준의특성을 HRE 없이구현했고, Honda 와의 motor 공동설계를통해양산적용으로연결했다.

4.5 2016 - Honda × Daido: HRE 완전 Free 의양산전환점

2016 년 Honda 와 Daido Steel 은 HRE 를전혀사용하지않는 hot-deformed NdFeB 를 Honda FREED 의 hybrid drive motor 에적용한다고발표했다. 중요한점은 **magnet replacement 가아니라 motor redesign**이었다. Honda 는 magnet shape 와 rotor shape 를수정해 magnetic flux flow 를최적화했고, conventional HRE magnet motor 와동등한 torque, output, heat resistance 를달성했다고밝혔다. Daido 는 METI 보조를받은신규생산라인에서 2016 년 8 월부터양산·출하를 시작했다.

4.6 2018 - 적용확대와냉각기술의역할

Daido 는 2018 년 Honda 의더높은 torque/output 을요구하는 2-motor hybrid system 에도 HRE-free magnet 이적용됐다고발표했다. 이단계에서는자석제조기술뿐아니라 magnet shape, magnetic circuit, 그리고 shaft 내부 ATF 공급에의한 rotor direct cooling 이함께사용되었다. 이는 HRE-Free 의본질을잘보여준다. 즉 **재료의부족한고온 margin 을냉각과자기회로설계로보완**하여시스템수준의동등성을만드는것이다.

4.7 2018 - Toyota: HRE-Free 에서 Nd-Reduced 로확장

Toyota 는 2018 년 Tb/Dy 를사용하지않으면서 Nd 사용량도최대 50% 줄이는것을목표로한 heat-resistant magnet 을발표했다. La/Ce 등상대적으로풍부하고저렴한 rare earth 를활용하면서 grain refinement 와 grain surface 제어를결합했다. 이개발은일본의자원전략이 Dy/Tb 제거에매우중요하고 **Nd 자체의미래수급까지선제적으로고려**하기시작했음을보여준다.

4.8 2024 이후 - 경제안보기술로격상

NEDO 는 2024 년경제안보중요기술육성프로그램에서 HRE-Free magnet 의고내열·고자력화, rare-earth-free magnet 의 새로운제조공정, 그리고차세대 magnet 특성에맞춘 motor design 을함께개발하는사업을시작했다. 목표는공급안정화와성능향상을동시에달성하여일본의 magnet/motor 산업경쟁력을유지·확대하는것이다. 이단계에서 HRE-Free 는개별회사의원가개선기술이아니라 **국가차원의핵심제조기술로명확히자리잡았다**고볼수있다.

5. 일본 HRE-Free 개발역사: 정책·소재·양산의연결

5.1 2000년대후반 - Dy 절감이국가 R&D 과제로전환

일본의 HRE-Free 개발은 2010 년대의단발성대응이아니라, 그이전부터진행된 **희소금속대체·사용량저감정책**의연장선에있다. NEDO 의희소금속대체·에너지절감소재프로젝트는 2008-2013 년기간에희토류자석용 Dy 를사용량저감또는대체가필요한대상원소로명시했다. 이시기의기술적질문은 “Dy 를없앨수있는가” 보다는 **보자력에실제로필요한위치에만 Dy 를배치할수있는가**에가까웠다. 따라서합금전체에 HRE 를균일첨가하는방식에서결정립계와자석표면을이용한국부강화방식으로연구중심이이동했다.

Source: NEDO, Rare Metal Substitute/Energy-Saving Materials Development Project (FY2008-FY2013).

5.2 2010-2014 - 공급충격이후 Reduce, Recycle, Diversify 의병행

희토류공급불안이현실화되면서일본의접근은세갈래로구체화되었다. 첫째는자석에서 Dy/Tb 를 **줄이거나제거**하는소재기술, 둘째는사용후모터에서 Nd/Dy 를회수하는 **재활용**, 셋째는공급선다변화이다. NEDO 는 2012-2014 년사용후모터에서고성능희토류자석을회수하고희토류원료를추출하는기술개발을추진했다. 이정책흐름은 HRE-Free 를단순재료원가절감이아니라 **자원순환과공급망복원력**의일부로서자리매김시켰다.

5.3 2014-2021 - 'Dy 를쓰지않는고성능자석' 이명시적목표가됨

NEDO 의 “차세대자동차용고효율모터용자성재료기술개발” 은공급위험이큰중희토류, 특히 Dy 를사용하지않는혁신적이고 성능자석과저손실연자성재료를함께개발하여고효율·소형모터를실현하는것을목표로했다. 여기서중요한변화는 **magnet performance 와 motor efficiency 를동일프로젝트의성과로연결했다**는점이다. 소재단품의 H_{cj} 가아니라실제모터의크기·효율·열적한계가최종지표가되기시작했다.

Source: NEDO, Development of Magnetic Materials for High-Efficiency Motors, FY2014-FY2021.

5.4 2016 - Honda × Daido: HRE-Free 의 '양산가능성' 을증명

2016 년 Honda 와 Daido Steel 은 HRE 를전혀사용하지않는 hot-deformed NdFeB 를신형 FREED 의 i-DCD 구동모터에적용했다. Daido 는열간가공법의미세결정조직과입계제어로내열성과보자력을높였고, Honda 는자석형상과 rotor 구조를변경하여자석에작용하는역자계를줄였다. 공식발표에서기존 HRE 자석모터와동등한 torque, output, heat resistance 를달성했다고설명한다. 이사례는 HRE-Free 는자석 Grade 의단순치환이아니라 **motor co-design 으로성립한다**는산업적기준점을만들었다.

5.5 2018 - Honda Insight: 더높은출력영역으로확대

2018 년에는동일한 HRE-Free 계열자석이 Honda INSIGHT 의 2-motor i-MMD 로확대되었다. 중형하이브리드는소형 i-DCD 보다높은 torque/output 이요구되므로열적부담도커진다. Daido 공개자료에따르면 magnet shape 최적화, 신규 magnetic circuit, shaft 내부로 ATF 를공급하여원심력으로 rotor 를직접냉각하는 **축심냉각**이결합되었다. 이는재료의고온 coercivity margin 을 cooling design 으로보완하는대표적사례이다.

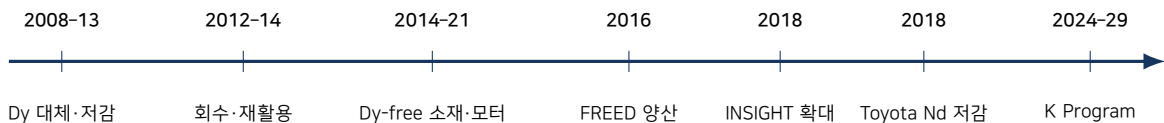
5.6 2018 - Toyota: HRE-Free 에서 Nd-Reduced 로자원전략확장

Toyota 의 “Nd-reduced heat-resistant magnet” 은 Tb/Dy 를사용하지않을뿐만아니라 Nd 일부를 La/Ce 로대체하여 Nd 사용량을최대 50% 줄이는방향을제시했다. 핵심은 (1) conventional magnet 대비 1/10 이하수준의 grain refinement, (2) 결정립표면에 Nd 농도를높이는 two-layer grain surface, (3) La/Ce 의특정합금비이다. 이접근은 **HRE 제거이후에도 Nd 자체 가장기적병목이될수있다**는관점에서일본자석전략을한단계확장했다.

5.7 2020 년대 - 공급망강인화에서경제안보핵심기술로

2020 년이후 NEDO 사업은 HRE-Free 고성능자석의실증, 희토류사용량극소화또는무사용신규자석탐색, 자원회수·분리정제까지범위를넓혔다. 2024 년 K Program 에서는 HRE-Free/rare-earth-free magnet 의새로운제조공정과 **차세대자석특성에맞춘 motor design**을함께개발하도록명시했다. 사업기간은 2024-2029 년, 예정예산은 34 억엔이며 AIST, DENSO, NIMS, Toshiba, Daido Steel, Tohoku University 등이수행체계에포함된다. HRE-Free 가개별 OEM 의구매정책을넘어국가제조경쟁력기술로취급되고있음을보여준다.

Source: NEDO K Program, Heavy-Rare-Earth-Free Magnets with High Heat Resistance and Magnetic Force, 2024-2029.



6. Dy/Tb 저감기술의발전과정

6.1 Step 1 - Bulk alloying: 가장확실하지만자원효율이낮은방식

전통적인고내열 NdFeB 는 Dy/Tb 를합금전체에첨가해 $Nd_2Fe_{14}B$ 주상의 anisotropy field 를높였다. 장점은설계·품질관리가비교적단순하고고온 H_{cj} 를확보하기쉽다는점이다. 반면 HRE 가결정립내부까지존재하면서 B_r 저하를동반할수있고, 실제감자개시가지배되는결정립표면보다훨씬넓은영역에고온 HRE 를사용하게된다. 즉 **coercivity margin 은크지만 HRE utilization efficiency 가낮다**.

6.2 Step 2 - Grain refinement: 감자 nucleation site 자체를줄임

NdFeB 의비가역감자는결함이많은결정립표면과국부역자계가큰영역에서시작되기쉽다. 결정립을미세화하면단일결정립내부의자구거동을제어하기쉬워지고, 적절한입계상과결합될때 coercivity 가증가한다. Daido 의 hot-deformed magnet 은일반적인 sintered magnet 보다훨씬미세한결정립을얻는점을활용한다. MEXT 자료는이미세조직제어와 grain-boundary phase 제어를통해 HRE 없이 Dy 4-5 wt.% 급 sintered magnet 에상당하는특성을달성했다고설명한다.

6.3 Step 3 - Grain Boundary Diffusion: HRE 를 '필요한곳에만' 배치

GBD(Grain Boundary Diffusion) 는 Dy/Tb 계열확산원을자석표면에서입계로침투시켜, 결정립표면부근에 HRE-rich shell 을형성하는대표적인 HRE-reduced 기술이다. 감자 nucleation 을억제하는위치에 HRE 를집중하므로 bulk alloying 보다적은 HRE 로 H_{cj} 를높이면서 B_r 손실을줄일수있다. 산업적으로는 HRE-Free 로바로이동하기어려운고온·고출력프로그램에서 매우현실적인중간단계이다. 최근연구도 GBD 가최소 remanence loss 로 coercivity 와 thermal stability 를높이는효과적방법이지만, HRE 비용을더낮추는것이계속되는과제라고정리한다.

6.4 Step 4 - Grain-boundary chemistry control: HRE 없이자기적분리강화

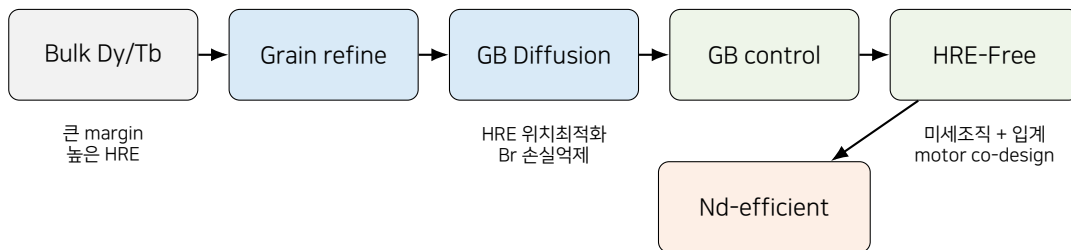
HRE-Free 에서는결정립계가더욱중요해진다. MEXT/Daido 연구에서는 grain-boundary phase 의두께와조성을조절하고, Nd-rich/Fe-lean 한입계상을형성하면결정립사이의 magnetic isolation 이강화되어 coercivity 가증가하는것으로설명한다. 즉 Dy/Tb 가담당하던역할일부를 입계상의구조와화학조성으로이전하는것이다.

6.5 Step 5 - Hot deformation: 미세결정·배향·형상제조의통합

열간가공자석은급냉분말을압축·열간변형하여 nano-scale 결정립을배향시키는방식이다. HRE-Free 에유리한미세결정조직을얻을수있지만 traction motor 용 plate 형상과균일한배향, 양산치수안정성을동시에달성해야한다. Daido 사례의기술적의미는소재특성뿐아니라 plate magnet 의 mass production technology까지확보하여실제 rotor 에적용했다는데있다.

6.6 Step 6 - Nd-efficient / composition engineering: 희소원소의범위를더넓게최적화

Toyota 는결정립을더미세화하고, coercivity 에효과적인 grain surface 에는 Nd 농도를높이되 grain core 에는줄이는 two-layer concept 을적용했다. 여기에 La/Ce 의특정조성비를결합하여 HRE 뿐아니라 Nd 소비까지줄였다. 기술방향은 "HRE 를 0 으로" 라는단일목표에서 critical rare-earth intensity per kW 를낮추는방향으로발전하고있다.



7. 대표사례심층분석

7.1 Honda × Daido: Material-Motor Co-design 의교과서적사례

Honda/Daido 의핵심은 HRE-Free magnet 의단품성능을기존 HRE-rich magnet 과동일하게만드는데만있지않았다. MEXT 자료는 Honda 의새로운 magnet/rotor design 이자석에작용하는 opposing magnetic field 를줄였고, 해석에서 demagnetization 이발생하지않도록했다고설명한다. 따라서설계자는 HRE-Free 전환시다음의등가관계를고려해야한다.

$$\text{Demag Margin} \approx f(H_{cj}(T), H_{reverse,local}, T_{mag}, t_{mag}, I_d, I_{peak})$$

즉 H_{cj} 하나가낮아져도 $H_{reverse,local}$ 과 T_{mag} 를낮추면시스템감자여유를유지할수있다. Honda 사례는이 trade-off 를실제 양산에서증명했다.

7.2 Honda 2018 Insight: Cooling 을 '자석성능' 의일부로취급

Insight 적용에서는 shaft 내부 ATF 공급과원심력을이용한 rotor direct cooling 이도입되었다. 전동기설계관점에서 magnet temperature 가낮아지면동일자석의 coercivity 가상승하므로, 냉각개선은사실상 thermal coercivity gain을얻는것과같다. 따라서 HRE-Free 프로젝트에서는냉각회로변경이단순열설계개선이아니라 magnet grade 를낮추거나 HRE 를제거할수있게 하는자원전략수단이다.

7.3 Toyota: 자원사용량을 magnetic microstructure 로재배치

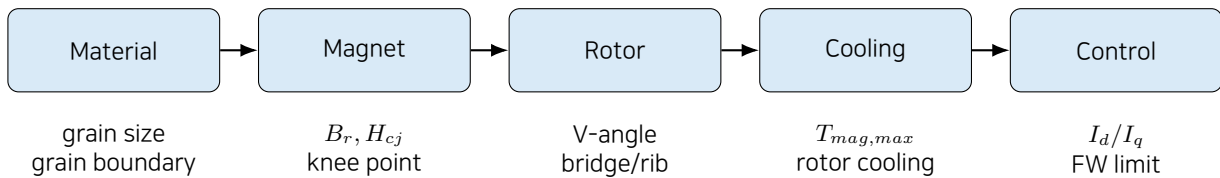
Toyota 의 three-point technology 는자석내부의희토류를균일하게사용하는기존개념에서벗어나, coercivity 에기여도가큰위치에 Nd 를집중하는방향이다. 이철학은 GBD 와도공통점이있다. 즉 희소원소를전체부피가아니라기능이필요한 microstructural location 에배치한다. Motor designer 에게는앞으로동일한 B_r/H_{cj} 표기 Grade 라도제조공법과미세조직에따라고온 recoil, knee, lot sensitivity 가달라질수있음을의미한다.

7.4 NEDO: 소재-모터-공급망을하나의기술시스템으로정의

2014-2021 사업은 Dy-free high-performance magnet 과 soft magnetic material 을통해고효율·소형모터를목표로했고, 2024 K Program 은 HRE-Free/rare-earth-free 제조공정과차세대 magnet 에적합한 motor design 을명시적으로결합했다. 따라서일본고객의 HRE-Free 요구는단순 “재료규격” 이아니라 **향후공급망과제품아키텍처를함께고정하는 system requirement**로해석하는것이적절하다.

사례	자석기술	Motor/System 기술	설계자에게주는의미
Honda/Daido 2016	HRE-free hot-deformed Nd-FeB, fine grain, GB control	magnet/rotor shape, flux path optimization	local reverse field 를낮추면낮은 HRE 의존도로동일성능가능
Honda Insight 2018	HRE-free hot-deformed magnet	magnetic circuit + shaft ATF rotor cooling	T_{mag} 를설계변수로적극낮춰 coercivity margin 확보
Toyota 2018	grain refinement, two-layer grain surface, La/Ce, Nd - 50% target	적용모터평가/양산기술개발	희소원소사용량자체가 motor KPI 로확대
NEDO 2014-29	Dy-free, HRE-free, RE-free 후보	high-efficiency / next-gen motor co-design	소재와모터를분리발주·평가하기어려워짐

8. 기술개발의핵심: 자석에서 Motor System 으로



HRE-Free 의성공여부는자석의 H_{cj} 한숫자로결정되지않는다. 같은자석이라도 magnet temperature 를낮추거나, 자석에집중되는 reverse field 를줄이는 rotor geometry 를사용하거나, field weakening 의 $-I_d$ limit 를조정하면 irreversible demagnetization margin 이달라진다. 따라서고객이 HRE-Free 를요구하면 Magnet Supplier, Motor Electromagnetic, Thermal, Mechanical, Inverter/Control 팀이동시에연결되어야한다.

9. HRE-Free 가 Motor 설계에미치는영향

항목	기존 HRE Magnet	HRE-Free 에서의변화/위험	검증포인트
Magnet	높은고온 H_{cj} 확보용이	고온 knee margin 감소가능	온도별 B-H/J-H
Rotor	기존 magnetic circuit	local reverse field 집중민감	edge/corner demag
Peak torque	큰 armature reaction	lpeak 에서국부감자가능	$T_{max} + I_{peak}$
Field weakening	큰 $-I_d$ 허용	demag risk 증가가능	Max speed + Max $-I_d$
Cooling	margin 보조역할	핵심설계변수로격상	Magnet T_{max}
NVH	기존 harmonic 특성	rotor redesign 으로변화	cogging/ripple/force
Production	검증된 grade/공급망	lot 편차와 H_{cj} 관리중요	min-spec material
Supply chain	HRE 조달필요	Dy/Tb risk 감소	traceability, definition

10. 전동기설계관점의기술적의미

10.1 1) Magnet specification 이' 재료상수' 에서' 운전영역데이터' 로바뀐다

HRE-rich magnet 은높은고온 H_{cj} 덕분에일부설계불확실성을재료 margin 으로흡수할수있었다. HRE-Free 에서는온도별 B-H/J-H curve, recoil permeability, knee point, lot minimum 특성이더중요해진다. 특히 catalog 의대표 H_{cj} 만으로는 Maxwell 의 irreversible demagnetization 을신뢰성있게판정하기어렵다. **20-180°C 의실제 curve 와 minimum-spec data**를 supplier 와합의해야한다.

10.2 2) Rotor geometry 가자원리스크대응수단이된다

자석 edge/corner 의 local reverse field 는평균 air-gap flux 만으로보이지않는다. V-angle, magnet burial depth, bridge/rib, flux barrier, magnet thickness 와 segmentation 을조정하면 peak reverse field 를낮출수있다. HRE-Free

에서는이국부장저감이단순 electromagnetic optimization 이아니라 HRE 를제거하기위한설계자유도가된다. 단, bridge 확대나자석위치변경은 reluctance torque, leakage, mechanical stress, NVH 를동시에변화시키므로 multi-physics 최적화가필요하다.

10.3 3) Peak torque 와 Field Weakening 의설계우선순위가높아진다

Rated point 보다감자에더위험한조건은보통 Tmax 에서의 peak current 와고속 field weakening 이다. 큰음의 I_d 는자석의 자화방향과반대인 armature reaction 을강화한다. 따라서 HRE-Free 전환시효율 map 만비교하면부족하며 Max torque / Max speed / Max $-I_d$ / fault current를별도 demag corner case 로관리해야한다.

10.4 4) Cooling 은 BOM cost 와공급망을움직이는설계변수다

자석온도를 10-20°C 낮출수있다면실제 coercivity margin 이증가하여더낮은 HRE 또는 HRE-Free grade 의적용가능성이 커질수있다. 반대로 rotor cooling 이부족한플랫폼에서는자석자체에더높은내열성을요구하게된다. 따라서 oil flow, shaft cooling, rotor heat path, stator-to-housing cooling 은 magnet cost 와 resource intensity 에직접연결되는변수로취급해야한다.

10.5 5) Br-Hcj trade-off 를 torque density 관점에서다시봐야한다

Dy 첨가는 coercivity 를높이는대신 remanence 를낮출수있다. HRE 저감은적절히설계하면 B_r 측면의이점을얻을가능성이있지만 coercivity margin 이줄수있다. 결과적으로 "가장높은 H_{cj} " 가최적이지아니라, 요구 torque density 를만족하면서 worst-case demag 를통과하는 minimum sufficient coercivity가경제적최적점이다.

10.6 6) NVH 와기계강도는 HRE-Free 의간접영향항목이다

감자내력개선을위해 magnet thickness, V-angle, barrier, bridge 를바꾸면 cogging torque, torque ripple, radial/tangential force order 가변한다. 또한고속 rotor 의 bridge/rib 변경은응력 margin 을바꾼다. 따라서 HRE-Free redesign 은 EM 성능만승인해서는안되며 electromagnetic-structural-NVH correlation 을함께확인해야한다.

10.7 7) 양산품질은평균값보다 lower-tail 관리가중요하다

HRE-Free 는소재 margin 이작아질수있으므로 lot-to-lot H_{cj} 편차, 자석치수, 착자율, rotor 조립위치, 접착/고정공정과실제 magnet temperature 편차가감자 risk 에직접연결된다. CAE 는 nominal grade 가아니라 minimum-spec magnet + maximum temperature + maximum current + worst rotor position의조합으로검증하는것이바람직하다.

10.8 설계 Trade-off Matrix

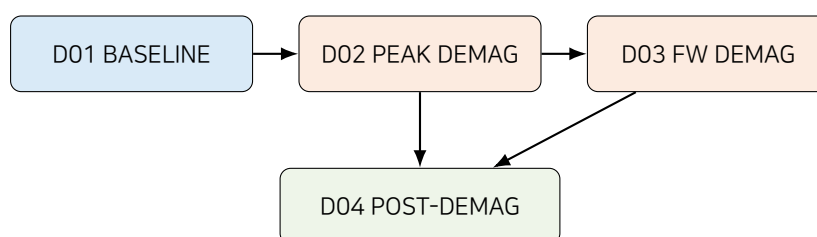
설계변수	HRE-Free 에유리한방향	얻는효과	주의할부작용
Magnet thickness	증가	permeance coefficient 및 demag margin 개선	cost, rotor space, flux saturation
V-angle / burial	local reverse field 저감방향 최적화	edge demag 억제	torque split, leakage, stress
Bridge/rib	자기·기계동시최적화	flux path 와고속강도확보	saturation, harmonic 변화
Rotor cooling	$T_{mag,max}$ 저감	고온 H_{cj} margin 증가	pump loss, oil routing, sealing
$-I_d$ limit	과도한 FW 제한	고속감자억제	max speed/voltage utilization 저하
Peak current time	duration 제한	thermal + demag stress 저감	launch/gradeability 성능
Magnet segmentation	eddy/thermal/local field 최적화	loss 및 hot spot 저감가능	assembly cost, tolerance

11. Aisin 등일본고객과의기술협의시확인사항

No.	확인필요정보	이유
1	HRE-Free 정의: Dy/Tb 완전 0 인지, 허용 ppm/wt.% 기준인지	Supplier/Grade 판정기준
2	지정 Magnet Grade 및제조공법	material model 기준
3	20/100/120/150/180°C B-H/J-H curve	Maxwell nonlinear demag
4	Maximum Magnet Temperature	thermal worst case
5	Maximum phase/peak current	peak demag
6	Maximum negative I_d 및 current angle	FW demag
7	Maximum speed / DC voltage	FW operating point
8	Fault/short-circuit requirement	abnormal demag
9	허용 irreversible flux loss	최종 OK/NG
10	CAE 와시험의 correlation 방법	양산 validation

12. Maxwell HRE-Free Demagnetization Analysis Procedure

12.1 해석구조



12.2 권장 Case Matrix

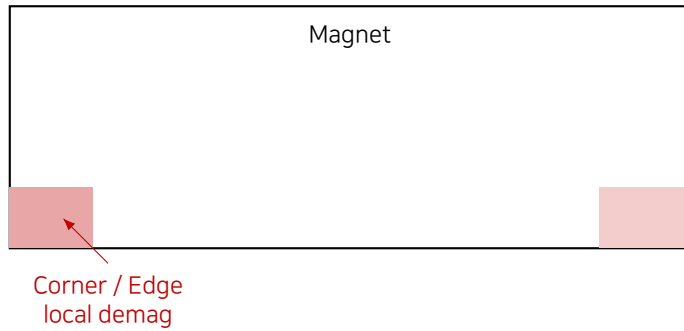
ID	Magnet Temp.	Current	Operating Point	목적
M01	60~100°C	Rated	MTPA	Baseline
M02	120°C	Rated	MTPA	Temperature sensitivity
M03	Tmax	Peak	Max torque	Peak demag
M04	Tmax	Imax	Maximum $-I_d$	FW demag
M05	Tmax	Fault	Short/abnormal	고객요구시
M06	Normal	Rated	Post-M03	irreversible loss
M07	Normal	Rated	Post-M04	irreversible loss

12.3 평가 KPI

Maxwell 의 demagnetization 기능을사용하여자석내부의 demagnetized operating point 와 Demag_Coef 분포를확인한다. 단, 면적비만으로판정하지않고다음을함께관리한다.

$$Demag\ Area\ Ratio = \frac{A_{demag}}{A_{magnet}} \times 100, \quad Flux\ Loss = \frac{\Psi_{before} - \Psi_{after}}{\Psi_{before}} \times 100$$

$$Torque\ Loss = \frac{T_{before} - T_{after}}{T_{before}} \times 100$$



확인항목:

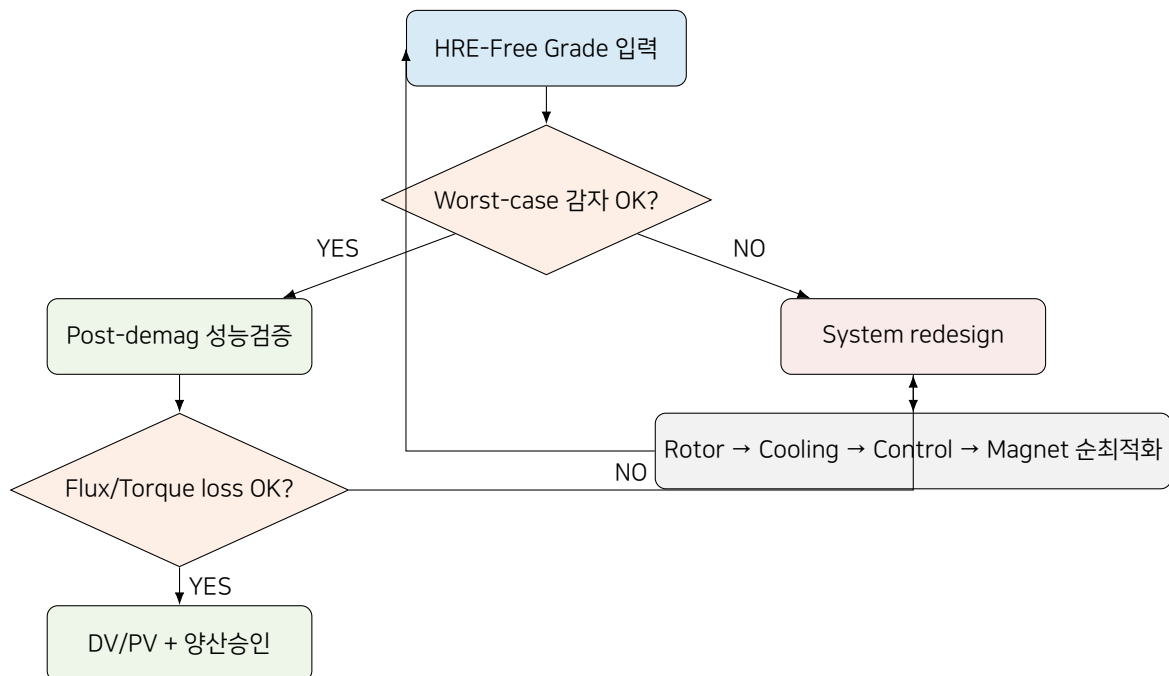
- Demag_Coef min
- Demag area ratio
- Post-demag flux
- Post-demag torque

13. HRE-Free 설계검증프로세스와의사결정기준

13.1 Stage-Gate 제안

1. **G0 Definition:** HRE-Free 의정량정의 (Dy/Tb 0 인지, impurity 허용치인지), supplier/grade/process 확정.
2. **G1 Material:** 온도별 B-H/J-H, recoil, B_r , H_{cj} , density, conductivity, lot minimum data 확보.
3. **G2 EM Screening:** rated/peak/FW/fault 에서 local reverse field 와 demag coefficient 비교.
4. **G3 Thermal Coupling:** magnet hot spot 과 transient temperature 를 EM demag case 에연결.
5. **G4 Rotor/NVH:** bridge/rib stress, overspeed, cogging/ripple, electromagnetic force 검증.
6. **G5 Post-Demag:** worst case 후정상온도에서 flux/torque/EMF 의 irreversible loss 확인.
7. **G6 Hardware:** min-spec magnet sample 과 worst thermal/current condition 으로 CAE correlation.
8. **G7 Production:** incoming inspection, traceability, lot monitoring, end-of-line flux/EMF 기준설정.

13.2 권장의사결정 Logic



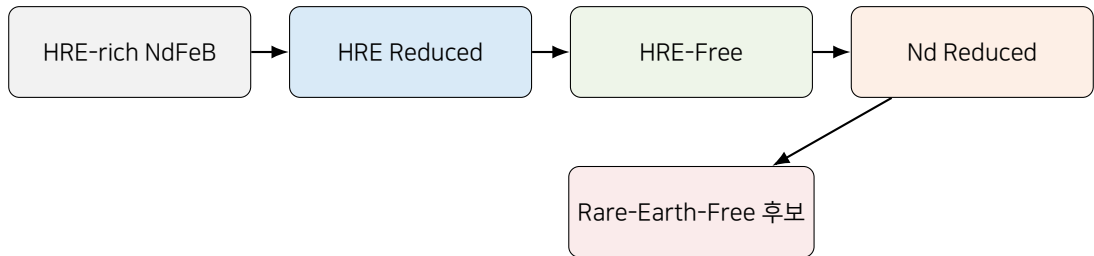
14. 설계최적화방향

감자가발생했다고바로높은 Grade 의자석으로되돌아가면 HRE-Free 의목적이약해질수있다. 다음순서로 system optimization 을검토하는것이바람직하다.

1. **Magnet:** grain/microstructure, thickness, width, magnetization direction, B_r/H_{cj} balance

- 2. **Rotor**: V-angle, bridge/rib, magnet position, flux barrier, local reverse-field reduction
- 3. **Cooling**: rotor/magnet direct cooling, oil flow, thermal path, Tmax reduction
- 4. **Control**: MTPA/FW current angle, $-I_d$ limit, peak-current duration
- 5. **Validation**: min-spec magnet + max temperature + max current + worst rotor position

15. 개발로드맵관점의정리



이로드맵은모든업체가동일한순서로이동한다는의미는아니다. 실제양산에서는성능, 비용, 생산성, 공급망을고려해 HRE-reduced 와 HRE-free 가병존할수있다. 다만일본의연구개발방향은 희소한원소를필요한곳에만쓰고, 가능하면제거하며, 동시에 motor system 전체를재설계하는방향으로일관되어있다.

16. 기술성숙도와향후개발방향

16.1 HRE-Reduced 와 HRE-Free 는당분간공존할가능성이높다

HRE-Free 가전략적으로중요하더라도모든 traction motor 가즉시 HRE-Free 로전환되는것은아니다. 높은 magnet temperature, 매우큰 peak current, 극단적인고속 field weakening 을요구하는프로그램에서는 GBD 기반 HRE-reduced magnet 이시스템비용과개발 risk 측면에서더유리할수있다. 반대로냉각여유가크고 magnetic circuit 을처음부터최적화할수있는신규플랫폼에서는 HRE-Free 의경제성이커진다. 따라서기술선정은 “HRE-Free 가더선진적” 이라는단순순위가아니라 required demag margin 대비 critical-material intensity 와 system cost 의최적화로판단해야한다.

16.2 기술옵션별상대비교

기술	HRE 사용	고온감자	B_r 확보	양산성	주요설계의미
Bulk HRE NdFeB	높음	매우유리	중간	매우높음	재 료 margin 이크나공급/원가 risk 큼
GBD Reduced	HRE- 낮음	유리	높음	높음	고성능 EV 의 현실 적절 충 안
HRE-Free tered 계열	sin- 없음	설계의존	높음	개발중/확대	입 계 제 어 와 rotor/cooling 최적화중요
HRE-Free deformed	hot- 없음	유리한잠재력	높음	Honda/Daido 양산실적	형 상 · 배 향 · 공 정 capability 가핵심
Nd-Reduced	HRE 없음	기술의존	조성의존	적용개발	Nd 공급 risk 까지 KPI 에 포함
Rare-Earth-Free	없음	소재별상이	일반적으로 NdFeB 와다름	연구/초기응용	motor topology 자체재 설계 가 능성 큼

16.3 2026 년시점의설계조직에필요한역량

첫째, magnet supplier 의재료데이터를 Maxwell material model 로변환하고온도별 knee 를검증하는능력이다. 둘째, electromagnetic 해석과 thermal network/CFD 결과를동일 worst-case duty 에서연결하는능력이다. 셋째, rotor stress 와 NVH 를포함한 multi-objective optimization 이다. 넷째, 자석의화학조성뿐아니라제조공법, lot, traceability 를설계 변경관리에포함하는품질체계이다. 다섯째, 공급망 risk 를 motor BOM 과연결하여 **kg-HRE/kW 또는 critical-material cost/kW** 같은지표로관리하는능력이다.

16.4 향후기술방향

NEDO 의 2024-2029 K Program 이보여주듯향후경쟁은단순 HRE-Free NdFeB 에머물지않는다. 고내열·고자력 HRE-Free magnet, Nd-free rare-earth magnet, 완전 rare-earth-free magnet 과각각의특성에맞춘 motor design 이병렬적으로진행될전망이다. Honda 역시현재공개기술자료에서 HRE-free magnet 의적용확대와장기적으로 rare-earth-free magnet 실용화를지향한다고밝히고있다. Motor engineer 입장에서는특정 magnet chemistry 에고정된설계보다 **magnet property window** 를입력으로받아 **topology/cooling/control** 을재최적화할수있는설계플랫폼이장기경쟁력이된다.

17. Aisin 프로젝트 적용을 위한 실무 권고

현재 보고서의 목적이 일본 고객의 HRE-Free 요구를 실제 motor development 에 반영하는 것이라면, 첫 번째 action 은 자석을 선정하는 것이 아니라 **고객의 HRE-Free 정의와 demagnetization acceptance criterion 을 수치로 고정**하는 것이다. “Dy/Tb intentionally added = 0” 인지, 분석상 검출되는 trace impurity 까지 제한하는 지에 따라 공급사 판정과 소재 인증 방식이 달라진다.

두 번째는 Maxwell 용 material data 를 representative curve 가 아닌 **minimum coercivity lot 기준**으로 확보하는 것이다. 온도는 최소 20/100/120/150/180°C 를 권장하며 실제 프로젝트 Tmax 에 맞추어 보간점을 추가한다. Peak current 와 maximum negative I_d 는 inverter/control 팀의 limit 와 동일한 정의를 사용해야 한다.

세 번째는 rotor redesign 의 우선순위를 “자석 Grade 상향” 보다 앞에 두는 것이다. 감자가 국부 corner 에서 시작한다면 전체 magnet H_{cj} 를 높이는 것보다 local reverse field 를 낮추는 V-angle, barrier, burial depth, magnet thickness 조정의 효과가 유효할 수 있다. 동시에 cooling 팀과 magnet Tmax 저감 가능 여부를 협의하여 electromagnetic margin 으로 환산해야 한다.

네 번째는 HRE-Free 의 합격 판정을 단순 demag area ratio 하나로 하지 않는 것이다. 실제 고객 가치와 연결되는 **post-demag back-EMF/flux linkage, torque loss, efficiency, NVH 변화**를 함께 판정해야 한다. 국부적인 작은 demag 영역이 있어도 성능 손실이 허용치 이내일 수 있고, 반대로 면적은 작아도 critical flux path 에서 발생하면 영향이 클 수 있다.

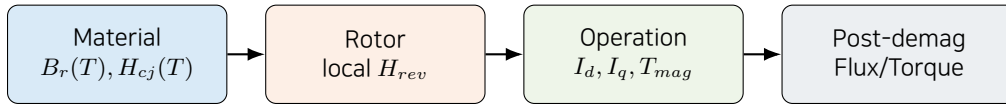
17.1 개발 회의용 핵심 질문 8 개

1. 고객이 말하는 HRE-Free 의 화학적 판정 기준은 무엇인가?
2. 지정 magnet supplier/process 가 있는가, 아니면 동등성 제안이 가능한가?
3. Tmax 는 steady-state 인가 transient peak 인가, 측정 위치는 어디인가?
4. I_{max} 와 -I_d max 의 지속 시간 및 반복 duty 는 어떻게 정의되는가?
5. short-circuit/inverter fault 에서 demag retention 요구가 있는가?
6. irreversible flux loss 허용치는 몇%이며 측정법은 무엇인가?
7. CAE correlation 용 magnet lot 는 nominal 인가 minimum-spec 인가?
8. rotor cooling 또는 magnetic circuit 변경에 대한 설계 자유도가 있는가?

18. Aisin 대응실무판: Magnet Grade 에서 Demag Margin 까지

18.1 실무판의목적과적용원칙

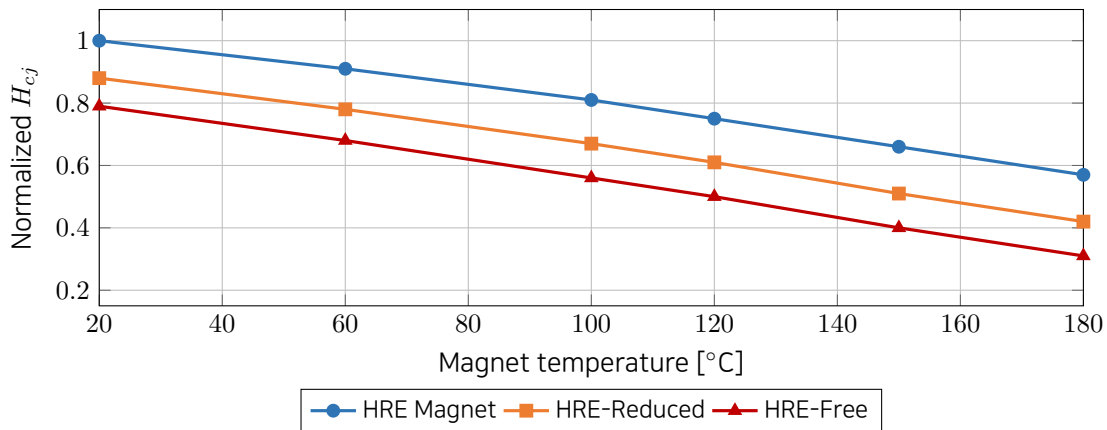
본장은 HRE Magnet, HRE-Reduced, HRE-Free 를단순재료등급으로비교하지않고, 온도별 B_r/H_{cj} - rotor 국부역자계 - 운전전류 - 냉각 - 비가역감자후성능을하나의설계체인으로연결하기위한실무 guideline 이다. Honda/Daido 의양산사례역시 HRE-free 자석만의치환이아니라 magnet/rotor 형상을함께수정하여 magnetic flux flow 를최적화하고기존자석 motor 와 동등한 torque, output, heat resistance 를확보한사례이므로, Aisin 대응에서도 system-level 검증을기본원칙으로둔다.



중요: 아래비교곡선은특정 Aisin magnet grade 의실측치가아니라설계논리를설명하기위한 정규화개념도이다. 실제승인 판에서는 supplier 가제공한 minimum-spec $J-H/B-H$ curve 를온도별로입력하여동일형식의그래프로교체해야한다.

18.2 B_r/H_{cj} -온도-감자 Margin 비교

Dy/Tb 의가장큰역할은고온에서의 intrinsic coercivity H_{cj} margin 확보이다. 반면 bulk HRE 첨가는일반적으로 B_r 측면에서 trade-off 가발생할수있으므로, HRE-Free 가반드시 “자력이약한자석” 을뜻하지않는다. Motor 설계에서중요한것은 B_r 한 점이야니라 worst-case 온도에서 knee 가실제 operating point 보다얼마나떨어져있는가이다.



위개념도처럼 HRE-Free 의핵심 risk 는고온에서 H_{cj} 가낮아지는구간에서 peak armature reaction 또는 field weakening 의역자계가겹치는것이다. 따라서재료비교는다음의 Demag Margin Index로연결하는것이실무적으로유용하다.

$$M_{demag} = \frac{|H_{knee}(T_{mag})| - |H_{rev,max}|}{|H_{knee}(T_{mag})|} \times 100\%.$$

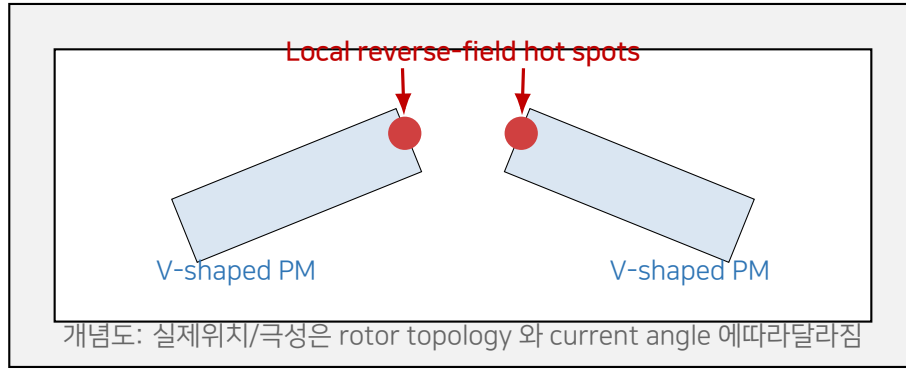
M_{demag} 가작거나음수가되는위치는 irreversible demagnetization 후보영역이다. 단, 실제판정은 nonlinear recoil 특성과 Maxwell 의 demagnetized operating point 계산을사용해야하며위식은설계 screening 지표로사용한다.

구분	HRE Magnet	HRE-Reduced	HRE-Free
고온 H_{cj} margin	가장확보하기쉬움	GBD/입계제어로효율화	재료/미세조직및 system 설계 의존증가
B_r 활용	HRE 조성에따른 trade-off 검토	비교적높은 B_r 유지가능	높은 B_r 잠재력, 단 grade 별확인필수
Rotor 설계자유도	상대적으로큼	국부역자계관리필요	edge/corner, bridge/barrier 최적화중요
Cooling 의존도	보조변수	중요	핵심 demag 설계변수
Control 제약	비교적작음	$-I_d$ limit 검토	peak/FW current map 과직접연동
Aisin 승인핵심	성능/원가	HRE 함량 + 성능	HRE 정의 + 최악 조건 demag+post-demag 성능

19. IPM Rotor 의 Edge/Corner 역자계와감자시작점

19.1 왜평균자계가아니라국부값을보아야하는가?

IPM rotor 에서자석전체평균 operating point 가안전해도자석끝단, flux barrier 인접부, bridge 근처에서는 armature reaction 과 leakage flux 때문에국부 reverse field 가집중될수있다. 특히고온 HRE-Free magnet 에서는이국부점이 knee 를먼저통과하여 corner demag 가시작되고이후유효자속감소로연결될수있다. 따라서 "magnet average H " 만으로승인하 면위험하다.



19.2 Edge/Corner 감자를키우는설계인자

인자	감자위험증가메커니즘	검토방향
Magnet edge/corner V-angle / burial depth	flux crowding 와역자계집중 d/q 축 reluctance 와 leakage 경로변화	corner field probe + Demag_Coef map torque 와 demag 를동시 DOE
Bridge/rib thickness	saturation 으로 local flux path 변화	stress constraint 와함께최적화
Flux barrier shape	barrier tip 에서 field concentration 가능	radius/chamfer/air region sensitivity
Magnet thickness	permeance coefficient 와 operating point 변화	B_r 활용과 H_{cj} margin 동시비교
$-I_d$ / current angle	자석자화방향반대성분증가	max speed/FW map 에서 worst angle 탐색
Magnet temperature	knee 가원점방향으로이동	thermal Tmax map 을 EM model 에전달
Rotor position	slotting/MMF 상대위치에따라 local peak 변화	electrical period sweep

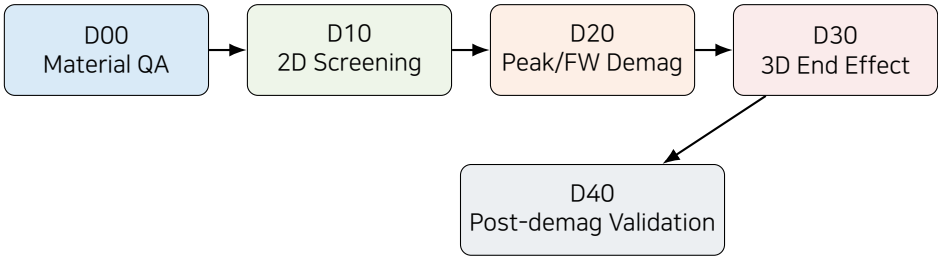
19.3 설계변경의우선순위

국부감자가발생했을때즉시고보자력 grade 로회귀하지않고, (1) hotspot 위치확인 → (2) 역자계원인분리 → (3) geometry/cooling/control 대책 → (4) material grade 재평가 순서로진행한다. Corner 에만집중되면 magnet end chamfer, barrier tip, burial depth, V-angle 등의국부 geometry 가효과적일수있다. 반대로자석넓은영역에서동시에 margin 이부족 하면재료 H_{cj} 또는 Tmax/전류 limit 가지배인자일가능성이높다.

20. Maxwell 2D/3D Demagnetization Design Guideline

20.1 해석모델의기본요구사항

Maxwell 의 Demag_Coef 는 nonlinear permanent magnet 에대해 0-1 의 scalar field 로제공되며 2D/3D Magnetostatic 및 Transient 에서사용할수있다. 1 은해당위치에서감자가없음을, 0 은완전감자를의미한다. 또한 source design 의 demagnetized operating point 를 target design 으로연결하여 post-demag 상태의성능을계산할수있으므로, stress case 와성능재평가를분리한 2-design workflow를권장한다.



20.2 권장 Case Matrix - Aisin 실무용

ID	Solver	T_{mag}	Current/Speed	주요 Output	목적
D00	Material	각온도	-	$B_r, H_{cj}, J-H$ knee	supplier/min-spec 입력검증
D10	2D Tran-sient	Normal	Rated MTPA	torque, flux, Demag_Coef	baseline correlation
D11	2D Tran-sient	Tmax	Peak I_{max}	min Demag_Coef, hotspot	peak torque 감자
D12	2D Tran-sient	Tmax	max $-I_d$, max speed	hotspot, flux loss	field weakening 감자
D13	2D Tran-sient	Tmax	고객 fault case	irreversible demag	short/abnormal 요구시
D20	2D sweep	Tmax	current angle sweep	worst rotor angle/time	worst-case 탐색
D30	3D Tran-sient	Tmax	D11/D12 worst	end/corner Demag_Coef	axial end effect 확인
D40	linked target	Normal	Rated MTPA	Ψ , BEMF, torque	post-demag 성능
D41	linked target	Normal	NVH points	ripple/force	감자후 NVH 영향

20.3 2D 와 3D 의역할분담

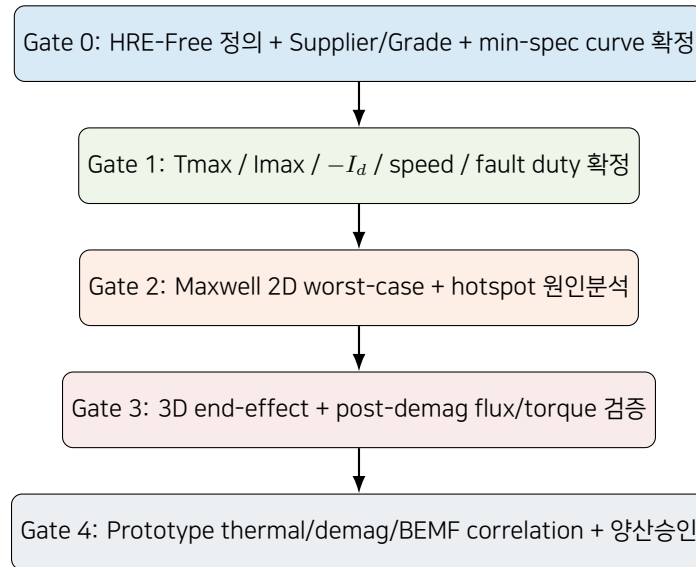
2D 는 current angle, rotor position, temperature, magnet grade, geometry DOE 를빠르게 sweep 하여 worst case 를찾는주력모델로사용한다. 3D 는모든 case 를반복하기보다 2D 에서선정된 worst 2-3 개조건에대해 magnet axial end, skew/segmentation, end leakage, 실제 end geometry 가 demag hotspot 을확대하는지확인하는 verification model 로사용한다. 이방식이계산시간과설계판단의균형이좋다.

20.4 Post-demag 판정 KPI

KPI	의미	Aisin 협의포인트
Minimum Demag_Coef Area/Volume below threshold	가장취약한국부점 감자영역의공간적크기	mesh sensitivity 와함께보고 threshold 를고객과사전협의
Flux linkage loss	실제유효자속저하	before/after 동일 operating point 비교
Back-EMF loss	자석자속변화의시험 correlation 지표	무부하 BEMF 측정과연결가능
Average torque loss	고객성능에직접연결	rated/peak 모두확인
Torque ripple / force	비대칭/국부감자의 NVH 영향	필요시 harmonic order 비교

21. Aisin Design Review 용 Demagnetization 판정 Flow

21.1 Gate 방식의 승인 절차



21.2 고객에게 받아야 할 최소 입력 데이터

1. HRE-Free 의정량정의: Dy/Tb intentionally-added zero 인지, ppm/wt.% upper limit 인지.
2. 지정 magnet grade/process 와 온도별 minimum $J-H$ 및 $B-H$ curve. 가능하면 lot variation 포함.
3. Magnet Tmax 의정의, 위치, 지속시간 및 thermal transient profile.
4. Maximum phase/peak current, I_d/I_q , current angle, 지속시간, 반복횟수.
5. Maximum speed, DC-link voltage 및 field-weakening control limit.
6. Short circuit/inverter fault 등 abnormal condition 의 감자 요구 조건.
7. Irreversible flux/BEMF/torque loss 허용 기준과 측정 방법.
8. CAE correlation 용 prototype magnet 의 실제 material certificate 와 시험 온도.

21.3 Aisin 제출 자료 권장 1-page Summary

최종 design review 에서는 많은 field plot 보다 다음 여섯 항목을 한 장에 고정하여 version-to-version 비교가 가능하도록 한다: (1) magnet grade/HRE definition, (2) Tmax, (3) worst current/speed, (4) min Demag_Coef 와 hotspot 위치, (5) post-demag BEMF/flux loss, (6) post-demag torque loss. 여기에 rotor 단면의 hotspot map 과 설계 변경 전/후 값을 나란히 배치하면 고객이 “재료 변경이 실제 motor risk 로 어떻게 연결되는가” 를 빠르게 판단할 수 있다.

Review item	Baseline HRE	HRE-Reduced	HRE-Free Candidate
Magnet grade / process	입력	입력	입력
Dy/Tb definition	입력	입력	입력
B_r/H_{cj} @ Tmax	입력	입력	입력
Worst operating point	동일 조건으로 비교		
Min Demag_Coef	결과	결과	결과
Demag hotspot	결과	결과	결과
Post-demag BEMF loss	결과	결과	결과
Post-demag torque loss	결과	결과	결과
Decision	Reference	Alternative	Approve / Optimize / Reject

22. 결론및실무제안

일본전동기제조사가 HRE-Free 를고집하는이유는 “친환경소재” 라는한문장으로설명하기어렵다. 본질은 고성능전동기의핵심 원재료를특정희소원소의공급·가격위험으로부터분리하려는장기산업전략이다. 기술적으로는 Dy/Tb 가제공하던고온보자력 margin 을미세조직, magnetic circuit, rotor geometry, cooling, current control 로분담하는방식으로발전해왔다.

Aisin 관련개발에서는다음세가지를우선확정할것을제안한다: (1) HRE-Free 의정량정의, (2) 온도별실제 demagnetization curve 와 minimum-spec material data, (3) irreversible flux loss 의고객합격기준. 이세항목을확보한뒤 Maxwell 에서 Peak 및 FW demag → post-demag 성능을연결하면 HRE-Free 의적용가능성을정량적으로판단할수있다.

23. 참고문헌및공개자료

1. Honda Motor / Daido Steel, “Daido Steel and Honda Adopt World’s First Hybrid Vehicle Motor Magnet Free of Heavy Rare Earth Elements,” 12 Jul. 2016. <https://global.honda/en/newsroom/news/2016/4160712eng.html>
2. Toyota Motor Corporation, “Toyota Develops New Magnet for Electric Motors Aiming to Reduce Use of Critical Rare-Earth Element by up to 50%,” 20 Feb. 2018. <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/21139684.html>
3. NEDO, “Development of Magnetic Materials for High-Efficiency Motors,” Project FY2014-FY2021. https://www.nedo.go.jp/english/activities/activities_ZZJP_100078.html
4. NEDO, 경제안보중요기술육성프로그램 - HRE-Free / Rare-Earth-Free magnet 및차세대 motor 개발, 25 Jul. 2024. https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101765.html
5. MEXT Element Strategy Initiative, “Development of Heavy-Rare-Earth-Free Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets and Their Practical Realization for Traction Motors.” <https://www.mext.go.jp/elements-strategy/en/digest/p25/>
6. Daido Steel, HRE-free NdFeB application to Honda Insight / i-MMD, 26 Dec. 2018. https://www.daido.co.jp/about/release/2018/1226_neodymium.html
7. NEDO, Rare-earth magnet recycling and separation/refining technology project information. https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100049.html
8. NEDO, “Rare Metal Substitute / Energy-Saving Materials Development Project,” Dy reduction/substitution activities, FY2008-FY2013. https://www.nedo.go.jp/activities/EF_00123.html
9. Daido Steel, “Heavy-rare-earth-free neodymium magnet adopted in Honda INSIGHT,” 26 Dec. 2018. https://www.daido.co.jp/about/release/2018/1226_neodymium.html
10. NEDO, “Materials substitution and usage reduction technology development/demonstration,” supply-chain resilience program. https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100189.html
11. NEDO, K Program implementation structure for heavy-rare-earth-free magnets, project P23030, 2024-2029. https://www.nedo.go.jp/koubo/EF3_100218.html
12. Honda, “Evolution of the e:HEV Powertrain,” HRE-free magnet and magnetic circuit development. https://global.honda/en/tech/Honda_eHEV_next_generation/
13. Ansys Maxwell Help, “Demagnetization Coefficient,” 2D/3D Magnetostatic and Transient solvers. <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v261/en/Subsystems/Maxwell/Content/Maxwell/DemagnetizationCoefficient.htm>
14. Ansys Maxwell Help, “Setting Demagnetization/Magnetization Computations for Source Designs.” <https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/Electronics/v242/en/Subsystems/Maxwell/Content/SettingDemagnetizationMagnetization.htm>
15. Journal of Alloys and Compounds, “Progress on grain boundary diffused Nd-Fe-B magnets,” 2026 review; GBD as a route to high coercivity with reduced HRE and limited remanence loss.

문서사용상주의

본문서는공개자료와기술검토를바탕으로작성한 engineering guideline 이다. 특정고객의 HRE-Free 함량기준, 자석 Grade, 감자허용률은고객공식사양서가우선한다. 예시온도와내부판정값은프로젝트요구사항에맞게확정해야한다.