

OpreX 배터리 웹 페이지 ES-5

Akira Kiyoto *1

Yokogawa는 1962년 필름 시트 제조 공정 측정장비인 온라인 두께 측정기를 최초로 출시한 이래로, 현재에 이르기까지 시트 제조 측정 및 제어 기술을 개발하는 한편 종이와 필름과 같은 시트 생산 품질 및 생산성 향상에 기여해왔다. 최근 몇 년 동안 전기차로의 전환은 리튬 이온 배터리를 포함한 이차 전지 제조 플랜트에 대한 투자 열풍을 선도하였다.

이차전지 시장의 확장과 함께, 2023년 Yokogawa는 다양한 국가의 법률과 규정 및 IoT(Internet of Things-사물인터넷)와 호환되는 필름 전용 모델인 WEBFREX NV 온라인 두께 측정기용 프레임 QC1F16를 출시하였고, 2010년 리튬 이온 및 기타 배터리 유형의 전극 시트 생산라인에 적합한 모델인 WEBFREX3ES를 개발하였으며 전 세계 주요 배터리 제조업체에서 널리 채택되었다. Yokogawa는 전극 시트의 코팅량을 측정함에 있어 환경적인 영향을 줄이고, 안전성을 개선하며, 효율성을 높이는 것과 같은 다양한 문제를 개선하기 위해 WEBFREX3ES의 후속 모델로 새로운 OpreX 배터리 웹 페이지인 ES-5를 개발하였다. 이 글에서는 이러한 새로운 측정 기술에 대하여 소개하는 바이다.

개요

배터리 전극 시트용 온라인 측정기는 배터리 전극 시트의 코팅량을 측정하는데 중요한 역할을 하고 있고, 제품 품질 향상에 기여한다. 양극 및 음극 슬러리의 균일성은 품질과 수율에 중대한 영향을 미친다. 심지어 불량한 코팅 품질은 사용중 발화와 같은 심각한 사고의 원인이 될 수 있다. Yokogawa는 50년 넘게 축적된 종이 및 필름 제조 공정의 온라인 시트 품질 관리 및 측정 기술에 대한 전문성을 바탕으로 2010년 배터리 전극 시트용 온라인 측정기인 WEBFREX3ES를 출시하였다^(*). 출시 후 코팅 중량을 측정하기 위해 리튬 이온 배터리 제조 현장에서 WEBFREX3ES를 채택하여 품질 및 비용의 개선에 기여하고 있다. Yokogawa 측정기의 장점은 제조 현장에서 오랫동안 운영 과정을 모니터링하고 이를 개선하면서 축적한 전문 지식이 있다.

최근 몇 년 동안 재생 가능한 에너지에 대한 관심이 증가하고 있고, 탈탄소 사회를 향한 노력이 이어지면서 보다 지속 가능한 사회를 실현하기 위해 전기차(EV)와 에너지 저장 시스템(ESS)을 더욱 빠르게 채용하고 있다. 리튬 이온 및 기타 이차 전지는 이러한 발전에 필수적이다. 이차 전지의 생산량은 2030년까지 계속 증가할 것으로 예상되고 있으며, 특히 중국과 유럽에서 새로운 리튬 이온 배터리 공장을 건설할 것으로 예상되고 있다. 그 결과 배터리 전극 시트의 온라인 측정기에 대한 요구가 증가하고 있으며, 이는 단순히 비용 및 품질 개선뿐 아니라 환경에 대한 영향을 줄이고, 안전을 보장하며, 디지털 전환을 통하여 효율성을 개선할 뿐 아니라, 디지털 전환(DX-)을 통한 생산 효율의 개선이라는 새로운 가치를 제공할 수 있어야 한다.

*1 P&W Solution Division, Yokogawa Products Headquarters

OpreX 배터리 웹 페이지 ES-5의 개요

OpreX 배터리 웹 페이지 ES-5(이후 “ES 5”)는 배터리 전극 시트의 코팅 양을 측정, 모니터링 및 제어하는 시스템이다. 이 시스템은 코팅 중량을 측정하는 센서가 포함된 프레임과 시스템의 작동 및 모니터링을 위한 측정 OPS(operator station-운영 스테이션)로 구성된다. 측정 OPS는 스위칭 허브를 통하여 두 개의 서브스테이션과 연결할 수 있으며, 옵션인 프로파일 스택 서버를 사용하여 대량의 프로파일 저장 및 관리 작업을 수행할 수 있다. 또한 외부 시스템과의 통합을 위해 ES-5는 코팅설비와의 통신인 MELSEC 시퀀서와의 입, 출력 및 상위 OPC Data Access(OPC DA) 클라이언트와의 출력을 지원한다. 그림 1은 시스템 구성의 예이다.

ES-5는 단일 코팅 라인에서 최대 5개의 프레임을 수용할 수 있다. 그림 2에서 확인할 수 있는 바와 같이, 프레임 #1은 코팅 전을 측정하고, 프레임 #2는 표면 코팅 직후 Wet 코팅상태를 측정하며, 프레임 #3는 표면을 건조한 후를 측정하고, 프레임 #4는 후면을 코팅한 직후 Wet 코팅 상태를 측정하며, 프레임 #5는 후면을 건조한 후를 측정하여 기준 중량(면적 질량)을 결정한다. 시트의 코팅 중량은 각 프레임에서 측정된 기준 중량의 차이를 통해 계산한다. 코팅 중량을 정확하게 계산하기 위해 코팅 전 및 후의 측정 포인트를 정렬하는 것이 중요하다. ES-5는 동기화된 측정 기능을 사용하여 각 프레임에서 측정되는 동일한 지점을 측정함으로써 코팅 중량을 정확하게 계산할 수 있다.

프레임 및 컨트롤 박스

그림 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, 프레임은 시트의 전체 폭을 스캔하는 전용 센서를 탑재한 프레임 자체와 제어 회로가 포함된 컨트롤 박스로 구성된다.

프레임은 최대 시트 측정 폭이 800mm인 단폭(짧은 길이)와 최대 측정 폭이 1,600mm인 장폭(긴 길이)의 두 가지를 사용할 수 있다. 측정된 데이터는 전용 측정 네트워크를 통하여 컨트롤 박스로부터 측정 OPS로 전송된다.

센서

센서는 베타선을 사용하는 투과형 측정 방법을 사용하고, 시트의 재질이나 코팅 물질과 관계없이 정밀한 측정 작업이 가능하다. 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 센서는 검출기를 포함하고 있는 위 헤드와 방사선원을 포함하고 있는 아래 헤드로 구성된다. 두 헤드 모두 프레임 내에서 동시에 스캔 작업을 수행할 수 있다. 시트는 위 및 아래 헤드 사이를 통과하고, 비접촉 방식을 사용하여 중량을 측정할 수 있다.

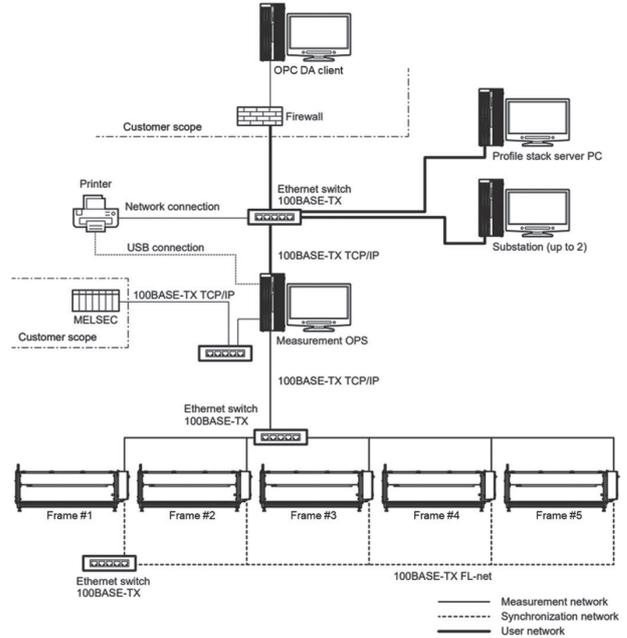


그림1 시스템 구성의 예

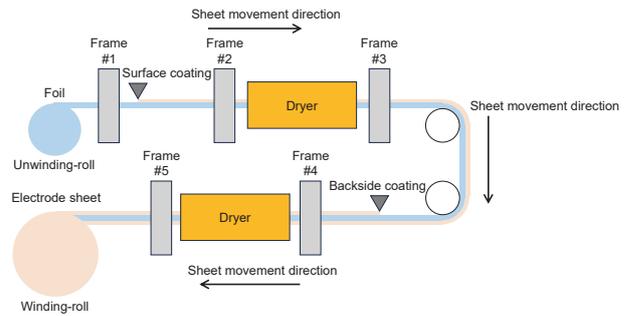


그림2 프레임 설치 위치

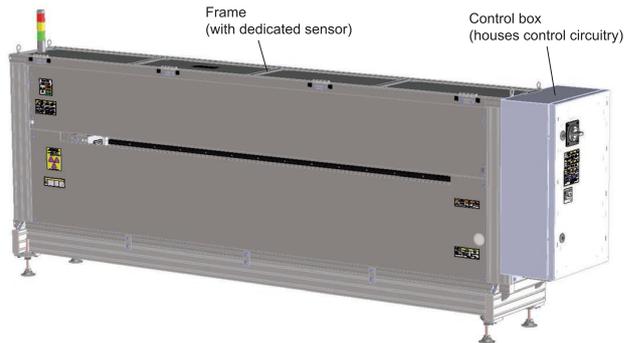


그림3 프레임 및 컨트롤 박스의 외관



그림4 센서의 외관

OpreX 배터리 웹 게이지 ES-5의 주요 특성

이차 전지 시장은 다음과 같은 도전에 직면해 있다:

- 공급망 내 CO₂ 배출의 감소
- 화재 사고를 방지 및 완화하기 위한 제조 품질 모니터링 및 개선
- 생산 효율의 향상

ES-5는 세 가지 주요 분야에서 가치를 제공함으로써 이러한 문제를 해결한다.

환경에 대한 영향의 감소

ES-5는 기존의 견고한 용접 구조물을 단일 Plate(베이스 플레이트)를 기반으로 설계한 제품으로 교체되어 재설계된 구조가 특징이다(자세한 내용은 다음의 “단일 Plate에 기초한 설계” 참조). 이로서 기존 프레임과 비교하여 보다 컴팩트하고 가벼운 시스템을 제공할 수 있게 되었다(표 1 참조). 프레임에 사용된 원자재를 절감한 이외에 수출 시 기존의 목재 상자로부터 카드 보드 포장으로 변경할 수 있어 포장용 폐기물을 줄이는데 기여하였다.

컨트롤 박스는 프레임의 반대편에 또는 별도로 분리하여 설치할 수 있다. 이러한 설계는 공간 활용을 최적화하여 보다 컴팩트한 생산 라인을 창조적으로 구축할 수 있다. 또한 기존의 프레임과 비교하였을 때 ES-5는 전력 및 공기 소비량을 크게 절감하여(표 1 참조) 공장에서 발생하는 CO₂의 감소에 기여한다.

견고성을 보장하기 위해 장치의 구조물에는 표준 알루미늄 프레임이 사용되었다. 이는 용접되지 않은 구조이기 때문에 유닛을 더 이상 사용하지 않게 되었을 때 쉽게 분해, 재사용 또는 폐기할 수 있다.

이러한 방식으로 ES-5는 제조, 운송, 운용 및 폐기의 모든 단계에서 환경에 미치는 영향을 감소시키는데 기여할 수 있다.

표1 기존의 및 새로운 프레임의 비교

Comparison items	Conventional frame (WEBFREX3ES)	New frame (ES-5)
Size	Width 2,460 mm Height 1,280 mm Depth 425 mm	Width 2,454 mm Height 1,006 mm Depth 380 mm ^[1]
Weight	Approx. 470 kg	Approx. 140 kg
Power consumption	0.8 kVA	0.25 kVA
Air consumption	8 N-m ³ /h	0.1 N-m ³ /h

[1] 360 mm without control box

안전하고 신뢰할 수 있는 배터리 제조

또한 ES-5는 재설계한 센서로 구성되어 배타선 조사 창 슬릿의 폭을 줄여 보다 세밀한 측정 피치를 선택할 수 있다(표 2 참조). 이로 인하여 품질 제어에 있어 중요한 코팅 엣지 및 기타 영역에 대하여 매우 정교하게 측정할 수 있다. 새로운 센서 역시 더 가벼워졌고(표 2 참조), 빠른 스캔 속도를 구현할 수 있어 품질의 변화를 놓칠 위험을 줄여준다. 이에 더하여 보다 컴팩트하고 가벼워진 반면 센서는 이전 모델에 비해 제품 주변에 실질적인 방사선 레벨을 감소시켜 관리해야 할 방사선 구역이 더욱 좁아졌다. 또한 측정 범위가 최대 2,000g/m² 까지 확대하여(표 2 참조), 보다 다양한 소재와 두께를 측정할 수 있게 되었고, 이를 통해 차세대 배터리의 개발 및 생산을 지원할 수 있게 되었다.

새로운 구성에는 기존의 온도 보정 이외에 대기압 보정 기능이 포함되고(자세한 내용은 다음의 “온도 및 대기압 보정”을 참조할 것), 환경의 변화에 더 적합하게 측정할 수 있으며, 더 긴 AUTCAL(auto-calibration-자동 보정) 주기를 보장한다. 또한, 새로운 프로파일 인 노이즈 감소 필터(자세한 내용은 다음의 “프로파일 노이즈 감소 필터의 갱신”을 참조할 것)는 작동을 시작한 후 프로파일 안정화에 필요한 시간을 단축시켜 준다. 이러한 새로운 구성은 기존의 모델보다 측정 시간을 증가시키고 자재의 손실을 줄여 주며, 안정적인 공장의 운영을 지원할 수 있다.

표2 기존의 및 새로운 센서의 비교

Comparison items	Conventional sensor (WEBFREX3ES)	New sensor (ES-5)
Beta-ray irradiation window	15 mm dia.	Min. slit width: 5 mm
Minimum measurement pitch	1 mm	0.5 mm ^[2]
Upper head weight (detector side)	Approx. 12.1 kg	Approx. 2.7 kg
Lower head weight (source side)	Approx. 15.4 kg	Approx. 4.1 kg
Maximum scanning speed	30 m/min	36 m/min ^[3]
Maximum measuring range	1,200 g/m ²	2,000 g/m ² ^[4]

[2] Applicable to sheet widths of 800 mm or less

[3] Applicable to measurement pitches of 2 mm or more

[4] Applicable to a slit width of 10 mm

배터리 생산의 디지털 전환(DX)

ES-5는 Yokogawa의 독점 코팅 자동화 제어 소프트웨어와 호환되어 최적의 생산 품질에 도달하는 시간을 단축시키고, 수율을 개선시킴으로 생산 효율을 향상할 수 있게 된다. 또한, 시스템은 매우 유연한 운용이 가능하며 모니터링 인터페이스도 제공하여 사용자의 필요에 맞는 모니터링 환경을 구현할 수 있다.

ES-5 플랫폼은 Yokogawa의 CI(Collaborative Information) 서버를 탑재하고 있으며, 이를 통하여 다음과 같은 이점을 제공할 수 있다.

- 임의의 위치나 장치로부터 원격으로 작동시켜 모니터링 및 제어가 가능하다.
- 개별적인 플랜트의 로컬 최적화뿐 아니라 다수의 플랜트 및 사이트 사이에서 전체적인 최적화 기능을 지원한다.
- 정보 시스템, 데이터 분석 애플리케이션 등과 통합하여 생산성을 개선하고 품질 향상에 기여한다. 그림 5는 CI 서버 통합을 보여준다.

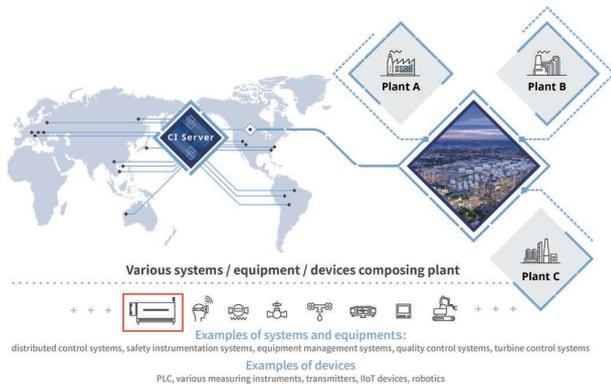


그림5 CI 서버의 통합 다이어그램

ES-5의 새로운 구성 및 기술 개요

이 섹션은 이전 모델과 비교하였을 때 ES-5에 추가된 또는 수정된 새로운 구성 및 기술에 대하여 소개한다.

단일 Plate를 기초한 설계

그림 6에서 확인할 수 있는 바와 같이, ES-5는 전극 시트를 위한 오프닝을 포함하는 단일 Plate를 사용하는 O-Frame으로 대체하는 재설계된 구조를 특징으로 한다. 구성 요소는 단일 Plate 위에 장착되며, 다음과 같은 이점을 제공한다.

- 견고한 용접 작업을 수행할 필요가 없어 장비의 크기와 무게를 현저히 줄일 수 있다.
- 구성 요소들이 단일 Plate의 동일한 표면에 장착되었기 때문에 위 및 아래 레일의 상대적 위치는 변하지 않기에 드라이어 및 기타 장비로 인한 온도 변화에 노출될 때 조차도 안정적으로 측정 작업을 수행할 수 있다.
- 공장에서 프레임을 설치할 때 설치한 표면이 완전히 수평이 아니라 할지라도 위 및 아래 레일의 상대적 위치는 변하지 않기 때문에 패스 라인(시트 운송 높이)을 정렬함으로 안정적으로 측정 작업을 수행할 수 있다.

- 단일 Plate 핀의 위치를 잡아 상/하 레일을 평행으로 정렬하거나 모터로 구동되는 부품을 조정하지 않으면서 구성 요소를 정확하게 장착할 수 있다.

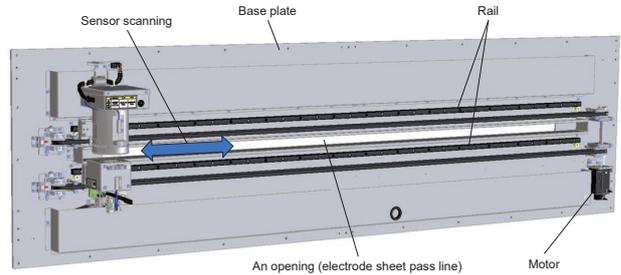


그림6 베이스 플레이트의 외관

온도 및 대기압 보정 모터

두께 측정 시스템은 방사선의 감쇠를 탐지함으로 시트와 접촉하지 않으면서 기초 중량을 측정한다. 상/하 헤드 사이에는 시트 이외에도 대기가 존재하기 때문에, 방사선은 공기층의 중량에 의하여도 감쇄된다. AUTCAL 중 공기층의 기초 중량이 동일한 상태를 유지하는 경우, 측정 값에 대한 그 영향력은 무시할 만하다. 그러나 공기층의 밀도가 변하는 경우, 측정 값에는 오프셋이 발생하게 된다.

기존의 측정기는 상/하 헤드 사이의 간격 내의 온도를 측정하고, 온도만을 사용하여 공기의 밀도를 보상한다. 측정의 정밀도를 유지하기 위해 약 2시간마다 정기적으로 AUTCAL 보정이 필요하다. 이와는 반대로 ES-5는 온도뿐 아니라 대기압 보정 기능이 있기 때문에 기존의 시스템과 비교하였을 때 AUTCAL 사이의 기간을 연장할 수 있다.

그림 7의 회색 라인은 대기압이고, 청색 라인은 온도 및 압력 보정 전의 기초 중량이며, 주황색 라인은 보정 후 기초 중량이다. 좌측의 수직 축은 기초 중량이고, 우측의 세로 축은 대기압이며, 수평 축은 측정 시간이다. 온도 및 압력 보정 값을 적용하기 전에는 대기압의 변화에 따라 기초 중량이 변동하게 된다. 그러나, 보정 후 안정성은 최소 2주 동안 $\pm 0.1g/m^2$ 이하를 유지한다. 이는 장비의 작동 시간을 개선하고 안정적인 공장 운용에 기여하게 된다.

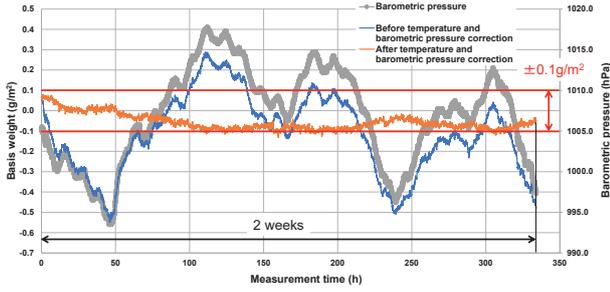


그림7 온도 및 대기압의 보정 효과

프로파일 노이즈 감소 필터 기능

두께 및 기초 중량을 측정함에 있어 방사선원의 방출은 시간이 경과함에 따라 프로파일에 노이즈를 유도하게 된다. 기존의 측정기는 전극 시트의 이동 방향인 MD(machine direction-기기 방향)로 여러 번 스캔 작업을 수행하여 측정 지점을 평활화하고 노이즈를 감소시킨다. 그러나 안정적인 프로파일은 다수의 스캔 작업을 필요로 하는데 이는 전극 시트 자재를 낭비하는 공정이다.

ES-5는 고속 프로파일 안정화를 구현하기 위해 MD 공정에 따른 평활화 작업에 이어 전극 시트의 폭 방향인 CD(cross direction-폭 방향)에서 새로운 노이즈 감소 필터 평활화 작업을 추가한다. 그 결과, 기존의 방법과 비교할 때 전극 시트 자재의 낭비가 감소하게 된다. 또한, CD 평활화 작업 중 노이즈로 인해 갑작스러운 값의 변화 사이를 구분하기 위해 임계값을 설정할 수 있다. 이를 통해 비정상적인 코팅 상태를 보다 쉽게 탐지 및 기록할 수 있다.

그림 8에서 노랑색 라인은 첫번째 스캔의 프로파일이고, 적색 라인은 MD 방향으로 평활화 작업을 수행한 기존의 보정 방법을 사용한 22회 스캔의 프로파일이며, 청색 라인은 CD 및 MD 방향 모두에서 평활화 작업을 수행한 새로운 보정 방법을 사용한 5회 스캔의 프로파일이다. 세로 축은 시트의 기초 중량이며, 가로 축은 측정 피치가 1mm이고 폭이 1,600mm인 시트의 측정 지점이다. CD 방향에서 평활화 작업은 15개의 세그먼트에 대한 이동 평균 값을 사용하여 수행한다. MD 방향에서 평활화 작업을 수행할 때, SMF(smoothing factor-평활화 계수)= 0.1을 사용하여 적용한다. 여기에서 SMF는 각 측정 포인트를 평활화하는데 사용되는 계수이고, MD의 경우, 다음 공식을 사용하여 수행한다.

$$\begin{aligned} & \text{각 측정 포인트의 계산 값} \\ & = \text{현재 측정 값} \times \text{SMF} \\ & + \text{이전에 SMF를 사용하여 계산한 값} \times (1 - \text{SMF}) \end{aligned}$$

기존의 보정 방법을 사용한 22회로 스캔한 프로파일의 표준편차(σ)는 0.19%인 반면, 5회 스캔의 새로운 보정 방법을 사용한 프로파일의 표준편차(σ)는 0.18%를 달성하여 더 빠른 프로파일 안정화를 실현하였다. 이러한 개선은 전극 시트 자재의 손실을 감소시키고, 공장의 안정적인 운용에 기여하였다.

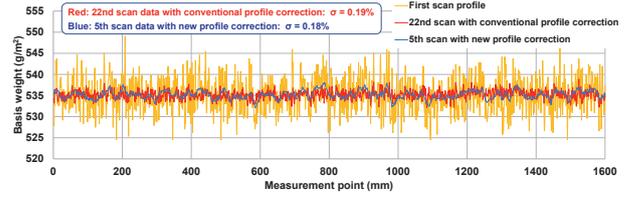


그림8 새로운 프로파일 노이즈 감소 필터의 효과

결론

새로 개발된 ES-5는 배터리 전극 시트의 두께를 측정하는데 특화된 장치이다. 시장의 요구를 만족시키기 위해 프레임부터 센서 및 시스템까지 완전히 새롭게 설계하였고, Yokogawa가 오랜 기간 동안 보유하고 있던 핵심적인 기술을 통합시켰다. ES-5를 통하여 Yokogawa는 더욱 높은 가치를 제공하여 이차 전지 시장의 지속적인 성장과 보다 지속 가능한 사회의 실현에 기여하고자 한다.

참고문헌

- (1) Takaaki Kishino, Yoshihiko Hagiwara, et al., “WEBFREX3ES Dedicated Coat Weight Measurement System for Battery Electrode Sheets,” Yokogawa Technical Report English Edition, Vol. 62, No. 1, 2019, pp. 9-14
- * WEBFREX, OpreX, and ES-5 are registered trademarks of Yokogawa Electric Corporation.
- * MELSEC is a registered trademark or trademark of Mitsubishi Electric Corp.
- * All other company names, organization names, product names, service names, and logos that appear in this paper are either registered trademarks or trademarks of Yokogawa Electric Corporation or their respective holders.

